Dennis Meadows
Donella Meadows
Jorgen Randers

Les limites à la croissance



Préface d'Yves-Marie Abraham





LES LIMITES À LA CROISSANCE
(dans un monde fini)

Donella Meadows
Dennis Meadows
Jorgen Randers

LES LIMITES À LA CROISSANCE
(dans un monde fini)

Le Rapport Meadows, 30 ans après

Traduction : Agnès El Kaïm





Les données chiffrées de cet ouvrage sont celles de l'édition originale, parue en 2004. Les principales évolutions depuis cette date ne remettant pas en question la démonstration des auteurs, ces valeurs sont reprises sans actualisation ni commentaire.

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée sous le titre
The Limits to Growth, the 30-Year Update.

Coordination : David Murray
Typographie et mise en pages : Yolande Martel

LES ÉDITIONS ÉCOSOCIÉTÉ
C.P. 32052, comptoir Saint-André
Montréal (Québec) H2L 4Y5

Dépôt légal : 1er trimestre 2013

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales du Québec et Bibliothèque et Archives Canada

Meadows, Donella H.

Les limites à la croissance dans un monde fini

(Collection Retrouvailles)
Traduction de : The limits to growth : the 30-year update.
Comprend des réf. bibliogr.

ISBN 978-2-89719-027-9

1. Développement économique – Aspect de l'environnement. 2. Développement durable. 3. Population – Aspect économique. 4. Pollution – Aspect économique. I. Meadows, Dennis L. II. Randers, Jørgen. III. Titre. IV. Collection : Collection Retrouvailles.

HD75.6.M4214 2012 338.9 C2012-942369-6

ISBN PAPIER 978-2-89719-027-9
ISBN PDF 978-2-89719-029-3
ISBN ePUB 978-2-89719-028-6

Nous remercions le Conseil des Arts du Canada de l'aide accordée à notre programme de publication. Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Fonds du livre du Canada pour nos activités d'édition.
Nous remercions le gouvernement du Québec de son soutien par l'entremise du Programme de crédits d'impôt pour l'édition de livres (gestion SODEC), et la SODEC pour son soutien financier.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE

Ces trente dernières années, de nombreuses personnes et organisations nous ont aidés à comprendre comment les limites qui s'imposent à la croissance matérielle allaient façonner notre avenir planétaire.

Nous dédions cet ouvrage à trois d'entre elles dont la contribution a été fondamentale : AURELIO PECCEI, fondateur du Club de Rome, dont la profonde préoccupation pour l'état de la planète et la foi indéfectible en l'humanité nous ont incités, avec beaucoup d'autres, à réfléchir aux perspectives qui s'offrent aux humains sur le long terme.

JAY W. FORRESTER, professeur émérite à la Sloan School of Management du Massachusetts Institute of Technology (MIT), dont nous avons été les élèves. C'est lui qui a conçu le prototype du modèle informatique que nous avons utilisé ; son exceptionnelle compréhension des systèmes nous a aidés à décoder le comportement des systèmes économiques et environnementaux.

Enfin, nous avons le triste honneur de dédier ce livre à son auteure principale, DONELLA H. MEADOWS. Surnommée Dana par tous ceux qui la respectaient et appréciaient son travail, elle était une penseuse, une écrivaine et une innovatrice sociale de classe internationale.

La noble idée qu'elle se faisait de la communication, de l'éthique et de son travail continue à être une source d'inspiration et de défi pour nous et pour des milliers d'autres. Elle est l'auteure d'une grande partie des analyses et de la prose de cet ouvrage,

mais celui-ci a été achevé après son décès survenu en février 2001. Nous espérons que cette édition honorera et fera avancer les démarches que, toute sa vie, elle a entreprises pour informer les citoyens du monde entier et pour les convertir au développement durable.

PRÉFACE

Pour une décroissance soutenable

En juin 2012, au sommet de Rio+20, les représentants des 193 États membres de l'ONU sont tous tombés d'accord, sans exception, pour affirmer que la protection de l'environnement est chose importante, mais ne doit pas affecter le taux de croissance de nos économies. Quelques jours plus tôt, à Los Gabos au Mexique, les membres du G20 ont eux aussi déclaré en chœur qu'une croissance forte, soutenue par une demande vigoureuse, reste le seul moyen de résoudre la crise européenne, de créer de l'emploi et d'accroître le bien-être des peuples de par le monde. Qui dira encore que nos chefs d'États ou de gouvernements sont incapables de s'entendre sur des questions essentielles ?

Terrifiante unanimité !

Malheureusement, au regard des conclusions formulées dans les pages qui suivent, il n'y a pas lieu de se réjouir d'une telle concorde entre les nations. Quarante ans après leur premier travail sur la question[1], les auteurs du présent ouvrage persistent et signent : en entretenant les conditions d'une croissance économique continue

1. Ce premier travail a été publié en France sous le titre *Halte à la croissance ?*, par le Club de Rome, aux Éditions Fayard (1972). L'édition américaine était intitulée *The Limits to Growth*.

à l'échelle planétaire, nous risquons ni plus ni moins l'effondrement de l'espèce humaine avant même la fin du XXIe siècle. Et il n'y a de salut à attendre ni du progrès technologique ni des « lois du marché », deux dimensions cette fois prises en considération, après avoir été sous-estimées par le modèle utilisé en 1972, dans la première version de ce travail de prospective.

Comment les époux Meadows[2] et leur collègue Jorgen Randers en sont-ils arrivés à poser un aussi sombre pronostic ? En partant de l'idée toute simple qu'une croissance infinie dans un monde fini est impossible, et en estimant que nous avons commencé à dépasser les limites de notre planète, qu'il s'agisse de sa capacité à fournir les ressources nécessaires à la croissance économique ou à assimiler les déchets qui en résultent. Le problème de ce dépassement est qu'il est le produit d'une croissance exponentielle, plutôt que linéaire – à un taux de croissance de 2 %, une économie double de volume non pas en 50 ans, mais en 35. Ses effets négatifs risquent par conséquent d'être soudains et brutaux, donc catastrophiques, parce qu'il sera trop tard alors pour « changer de cap ».

Seul l'avenir nous dira, peut-être, la justesse de ces prédictions. Pour l'heure, soulignons au moins leur crédibilité. Formulées avec beaucoup de prudence, elles reposent sur des hypothèses qui n'ont rien d'exagérément pessimistes. Par exemple, le modèle générateur des 11 scénarios discutés ici n'intègre pas les effets aggravants d'éventuels problèmes sociopolitiques (conflits, instabilité, insécurité, inégalités, corruption, etc.)… Autre élément de crédibilité : les projections du scénario « *business-as-usual* » élaboré en 1972 s'avèrent très proches de ce qui s'est effectivement passé sur Terre depuis 40 ans, aussi bien sur le plan écologique que démographique[3]. Cela ne prouve évidemment pas que les

---

2. Donella Meadows est décédée avant la parution de cette mise à jour.

3. Voir en particulier : Graham Turner, « A Comparison of The Limits to Growth with 30 Years of Reality », *CSIRO Working Paper Series*, 2008-09, juin 2008, 52 pages. Disponible en ligne : <www.csiro.au/files/files/plje.pdf>.

Meadows et leur équipe ont raison concernant l'avenir, mais incite au moins à les prendre au sérieux, outre le fait qu'il s'agit de chercheurs patentés, ayant peaufiné leur travail pendant des années au sein d'universités aussi réputées que le M.I.T.

Une croissance destructrice, mais aussi injuste et aliénante

Si ces scientifiques voient juste, comment éviter l'effondrement annoncé ? La solution qu'ils préconisent n'a pas varié depuis leur premier rapport : contrôler la croissance démographique ne suffira pas, il faut mettre un terme à la croissance économique. Évidemment, cette solution n'est simple que dans son principe. Elle soulève par ailleurs d'inévitables questions. Ne pourrait-elle pas en effet s'avérer contreproductive ? Car enfin, comment exclure totalement l'éventualité que ne soient inventées des technologies révolutionnaires, permettant de poursuivre la croissance économique sans causer les catastrophes promises par ces prospectivistes ? Et dans ce cas, ne faut-il pas justement soutenir la croissance, dans la mesure où elle constitue à la fois un facteur favorable à de telles inventions et le meilleur moyen d'en tirer parti ?

Notons d'abord qu'il faut une foi sans borne dans le « progrès » pour croire aujourd'hui à la possibilité d'un tel miracle technologique. Mais surtout, même dans l'hypothèse très peu probable où nous trouverions les moyens techniques d'éviter la gigantesque catastrophe écologique qui nous menace, les autres problèmes que pose la croissance économique justifient à eux seuls que l'on souhaite son arrêt.

Cette course dans laquelle presque tous les humains sont désormais embarqués est certes d'abord épuisante pour la biosphère, seul habitat qui nous soit disponible à ce jour. Mais elle est épuisante aussi pour nos sociétés, dont la cohésion est toujours davantage fragilisée par la lutte de tous contre tous que suppose la quête d'une croissance économique continue. De même, elle est épuisante pour chacun d'entre nous, qui devons sans relâche

produire des marchandises que d'autres voudront bien acheter, sous peine de perdre tout moyen d'existence et d'être mis sur la touche. Les épidémies de dépressions et de « *burn out* » qui sévissent en Occident ne sont-elles pas symptomatiques d'un tel épuisement ?

Par ailleurs, cette croissance économique s'avère injuste. Premièrement, elle tend à profiter surtout à une minorité d'entre nous. Le creusement des inégalités sociales observé en Occident au cours des trois dernières décennies, malgré un taux de croissance positif, semble en tout cas le confirmer une nouvelle fois. Deuxièmement, cette croissance est injuste à l'égard des générations futures, du fait qu'elle repose sur la destruction de ressources non renouvelables (hydrocarbures, minerais, etc.) et renouvelables (espèces animales et végétales). Le principe défendu par les économistes orthodoxes d'une substitution de capital artificiel au « capital naturel » a évidemment des limites : il n'y a pas de substituts à de l'eau buvable, de l'air respirable, de la terre fertile. Troisièmement, la croissance économique des deux derniers siècles n'a cessé de réduire les possibilités d'existence des êtres vivants non humains. Il y a là non seulement un danger pour les humains, mais une injustice flagrante, en particulier à l'égard de ceux que nous appelons les animaux.

Enfin, cette course à la production de marchandises est profondément aliénante. Fondée sur le progrès technoscientifique, elle augmente de manière continue notre dépendance à l'égard de machines qui réduisent finalement bien plus notre autonomie que notre labeur. Elle tend en outre à imposer l'argent comme une fin en soi, aussi bien aux « prolétaires » qu'aux « bourgeois ».

> Pour pouvoir vendre notre travail, nous avons intériorisé la logique propre au capitalisme : pour celui-ci, ce qui est produit importe pour cela seulement que cela rapporte ; pour nous, en tant que vendeurs de notre travail, ce qui est produit importe pour autant seulement que cela crée de l'emploi et distribue du salaire. Une complicité structurelle lie le travailleur et le capital : pour l'un et pour l'autre, le but déterminant est de « gagner de l'argent », le plus

d'argent possible. L'un et l'autre tiennent la « croissance » pour un moyen indispensable d'y parvenir. L'un et l'autre sont assujettis à la contrainte immanente du « toujours plus », « toujours plus vite »[4].

Se libérer du travail

Si la recherche d'une croissance économique indéfinie présente d'aussi graves inconvénients, on peut se demander pourquoi nous persévérons dans cette voie sans issue et comment il peut se faire que l'alerte lancée il y a 40 ans par les auteurs de ce livre ne semble toujours pas avoir été entendue ?

Pas plus que les Troyens sans doute, nous n'aimons les Cassandre. Par ailleurs, comme diraient les marxistes d'antan, la « superstructure » de nos sociétés a produit et diffusé de nombreux discours tournant en dérision les travaux comme celui des Meadows et imposé l'idée que la croissance n'est pas le problème, mais la solution. Les économistes notamment ont joué sur ce plan un rôle crucial. Mais outre ces professionnels de la justification du capitalisme, d'autres acteurs plus sensibles à la question écologique ont également contribué à nous persuader qu'il était possible de continuer à croître sur le plan économique sans mettre en danger l'espèce humaine. Force est bien de constater aujourd'hui que l'idéologie du « développement durable », quelle que soit la pureté des intentions de ses partisans, a retardé ou même empêché une vraie prise de conscience de la gravité de la situation.

Cela dit, l'absence de remise en question de la course à la croissance tient aussi au fait que, pour quiconque vit dans le monde capitaliste, il est très difficile et coûteux de ne pas courir, comme le soulignait au début du siècle dernier le sociologue Max Weber : « Chacun trouve aujourd'hui en naissant l'économie capitaliste établie comme un immense cosmos, un habitacle dans lequel il doit vivre et auquel il ne peut rien changer – du moins en tant qu'individu. Dans la mesure où l'individu est impliqué

4. André Gorz, *Ecologica*, Paris, Galilée, 2008, p. 115.

dans les rapports de l'économie de marché, il est contraint à se conformer aux règles d'action capitalistes. Le fabricant qui agirait continuellement à l'encontre de ces règles serait éliminé de la scène économique tout aussi infailliblement que serait jeté à la rue l'ouvrier qui ne pourrait, ou ne voudrait, s'y adapter[5]. »

Comment alors se sortir de ce piège, que nous avons nous-mêmes creusé ? Weber le suggère : la sortie ne peut être que collective. Ajoutons qu'elle doit être politique. Pour en finir avec cette course à la croissance, la « simplicité volontaire » est certes une condition nécessaire, mais pas suffisante. Il faut viser le démantèlement de cette formidable machine à produire des marchandises qu'est l'entreprise (qu'elle soit d'ailleurs privée ou d'État), et l'arrêt de son moteur principal : le travail, une activité inventée par notre monde, « que l'on exerce pour le compte d'un tiers, en échange d'un salaire, selon des formes et des horaires fixés par celui qui vous paie, en vue de fins que l'on n'a pas choisies soi-même »[6].

Évidemment, cela suppose en premier lieu de se libérer de l'idée qu'il n'y pas d'existence humaine digne de ce nom sans travail. L'œil du poète peut nous y aider : « Comment diable un être humain peut-il se réjouir de se faire réveiller à 6 h 30 du matin par une alarme, sauter du lit, s'habiller, se forcer à avaler quelque chose, chier, pisser, se brosser les dents et les cheveux, puis affronter les embouteillages pour aller faire gagner un paquet de fric à quelqu'un, qui s'attend en plus à ce qu'on lui en soit reconnaissant[7] ? » Les crises économiques qui frappent actuellement les pays occidentaux pourraient aussi être l'occasion, au moins pour certains, de commencer à s'inventer des vies libérées du travail, c'est-à-dire de l'obligation de fabriquer des marchandises – des « valeurs d'échange » – pour gagner de l'argent.

---

5. Max Weber, *L'éthique protestante et l'esprit du capitalisme*, Paris, Plon, 1964, p. 53.
6. André Gorz, *Adieux au prolétariat*, Paris, Galilée, 1980, p. 7.
7. Charles Bukowski, *Factotum*, Black Sparrow Books, 1975 [traduction de l'auteur].

Mais, encore faut-il avoir accès aux moyens matériels et intellectuels de produire, pour nous-mêmes, ce dont nous avons besoin – des « valeurs d'usage ». La privatisation et la concentration de ces moyens entre les mains de quelques-uns, à qui nous sommes dès lors contraints de vendre notre force de travail, doivent par conséquent être remises en question. Le projet socialiste n'a rien perdu de sa pertinence en somme ; la fin de cette société fondée sur le travail et la marchandise passe nécessairement par une socialisation de nos moyens d'existence. À cet impératif, s'en ajoute un autre, que le socialisme a presque toujours ignoré : nous devons fixer des limites aux besoins qu'il s'agit de satisfaire. Ces limites, ainsi que la distribution de nos ressources naturelles et de nos moyens de production, doivent par ailleurs être établies sur une base rigoureusement démocratique.

Tels sont les principes élémentaires de ce que l'on peut appeler l'éco-socialisme ou la décroissance soutenable. Reste à convaincre nos contemporains qu'il est grand temps de s'engager sur cette voie. Les quelque 400 pages qui suivent, solide et captivante mise à jour d'une recherche essentielle pour la suite du monde, devraient y contribuer.

Yves-Marie Abraham
Professeur de sociologie à HEC Montréal

Préface des auteurs

Les limites à la croissance *(dans un monde fini)* est la seconde réédition, augmentée, du livre *The Limits to Growth*. Cet ouvrage a été publié en 1972[1] ; puis, en 1992, nous en avons publié une version révisée, *Beyond the Limits*[2], dans laquelle nous débattions des développements intervenus à l'échelle planétaire en 20 ans, par rapport aux scénarios de *The Limits to Growth*. Cette nouvelle mise à jour, 30 ans après cette fois-ci[3], présente les aspects essentiels de notre travail d'origine et fait le bilan des données et des idées pertinentes que nous avons récoltées durant ces 30 années.

---

1. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers et William W. Behrens III, *The Limits to Growth*, New York, Universe Books, 1972. Ce livre a été traduit en français sous le titre *Halte à la croissance ?*, Paris, Fayard, 1972. Deux ouvrages techniques ont également été publiés : Dennis L. Meadows *et al.*, *The Dynamics of Growth in a Finite World*, Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1974 ; et Dennis L. Meadows et Donella H. Meadows, *Toward Global Equilibrium*, Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1973. Le premier est une documentation complète sur le modèle World3 et le second se compose de 13 chapitres présentant des études annexes et des sous-modèles introduisant le modèle global. Les deux ouvrages sont aujourd'hui distribués par Pegasus Communications, One Moody Street, Waltham, MA 02453-5339, États-Unis (<www.pegasuscom.com>).

2. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows et Jorgen Randers, *Beyond the Limits*, Post Mills, VT, Chelsea Green Publishing Company, 1992. Littéralement, *beyond the limits* signifie « au-delà des limites ». Cet ouvrage n'a pas été traduit en français.

3. L'édition originale du présent ouvrage est parue aux États-Unis en 2004.

The Limits to Growth a été élaboré au sein du Groupe Dynamique des Systèmes de la Sloan School of Management du Massachusetts Institute of Technology (MIT), entre 1970 et 1972. Notre équipe se servait de la théorie de la dynamique des systèmes et de la modélisation informatique pour analyser les causes et les conséquences à long terme de la croissance sur la démographie et sur l'économie matérielle mondiales. Nous traitions de questions telles que : *les politiques actuelles nous conduisent-elles vers un avenir soutenable ou vers l'effondrement ? Que peut-on faire pour créer une économie humaine qui fournisse de tout en quantité suffisante à tous ?*

Nous avions été chargés de réfléchir à ces questions par le Club de Rome, un groupe informel et international composé d'éminents hommes d'affaires, de dirigeants et de scientifiques. La Fondation Volkswagen, en Allemagne, finançait notre travail.

C'est ainsi que Dennis Meadows, alors enseignant au MIT, constitua et dirigea l'équipe ci-dessous qui, pendant deux ans, allait mener la première étude.

Alison A. Anderson, PhD (États-Unis)
Erich K. O. Zahn, PhD (Allemagne)
Ilyas Bayar (Turquie)
Jay M. Anderson, PhD (États-Unis)
Farhad Hakimzadeh (Iran)
William W. Behrens III, PhD (États-Unis)
Judith A. Machen (États-Unis)
Steffen Harbordt, PhD (Allemagne)
Donella H. Meadows, PhD (États-Unis)
Peter Milling, PhD (Allemagne)
Nirmala S. Murthy (Inde)
Roger F. Naill, PhD (États-Unis)
Jorgen Randers, PhD (Norvège)
Stephen Schantzis (États-Unis)
John A. Seeger, PhD (États-Unis)
Marilyn Williams (États-Unis)

L'un des piliers de notre projet était le modèle informatique « World3 » que nous avions construit pour intégrer les données et les théories relatives à la croissance[4]. Grâce à ce modèle, nous pouvons produire des scénarios sur le développement mondial qui sont parfaitement cohérents. Dans *The Limits to Growth*, nous avions publié et analysé 12 scénarios de World3 montrant différents modes de développement de l'humanité sur deux siècles, entre 1900 et 2100. Dans *Beyond the Limits* figuraient 14 scénarios produits par une version quelque peu mise à jour de World3.

The Limits to Growth est devenu un best-seller dans de nombreux pays et a été traduit dans environ 30 langues. *Beyond the Limits* a été traduit dans plusieurs langues et fait référence dans le milieu universitaire.

1972 : *The Limits to Growth*

Dans *The Limits to Growth*, nous expliquions que les limites écologiques planétaires (en matière d'utilisation des ressources et d'émissions de polluants) auraient une influence importante sur le développement mondial durant le XXIe siècle. Nous attirions l'attention du lecteur sur le fait que l'humanité allait peut-être devoir consacrer beaucoup de capital et de main-d'œuvre pour lutter contre ces limites, au point que la qualité de vie moyenne pourrait baisser au cours du XXIe siècle. Nous ne précisions cependant pas quelles pénuries ni quels types d'émissions risquaient de mettre fin à la croissance en nécessitant plus de capital

4. Ce modèle a été précédé d'un World1 et d'un World2. World1 était le prototype conçu dans les grandes lignes par Jay Forrester, professeur au MIT, en réponse aux questions du Club de Rome sur les interconnexions entre les tendances et les problèmes internationaux. World2 est le modèle final, documenté, de Forrester, décrit dans Jay W. Forrester, *World Dynamics,* Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1971. Cet ouvrage est aujourd'hui distribué par Pegasus Communications. World3 a été développé à partir de World2, avant tout en faisant évoluer sa structure et en élargissant sa base de données quantitative. Forrester est le concepteur du modèle World3 et de sa méthode de modélisation de la dynamique des systèmes.

qu'il n'y en aurait de disponible ; cela est tout simplement dû au fait qu'il est impossible de faire des prévisions scientifiques si détaillées au sein du système complexe qui est le nôtre et qui mêle population, économie et environnement.

The Limits to Growth plaidait pour une innovation sociétale profonde et proactive, fondée sur des changements technologiques, culturels et institutionnels, pour éviter que l'empreinte écologique de l'humanité ne dépasse la capacité de charge de la planète Terre. S'il est vrai que nous présentions ce défi mondial comme sérieux, le ton de l'ouvrage était néanmoins optimiste, insistant sans relâche sur la marge de manœuvre dont nous disposions pour atténuer les dégâts causés par l'approche (ou le dépassement) des limites écologiques planétaires, à condition d'agir rapidement.

Les 12 scénarios produits par World3 dans *The Limits to Growth* montrent à quel point l'augmentation de la population et de l'utilisation des ressources se heurte à toute une série de limites. Dans la réalité, les limites à la croissance prennent différentes formes. Dans notre analyse, nous avons avant tout insisté sur les limites physiques de la planète, qui s'expriment à travers la disparition des ressources naturelles et la capacité limitée de la Terre à absorber les émissions industrielles et agricoles. Dans tous les scénarios réalistes de World3, ces limites obligent la croissance physique à s'arrêter à un moment ou à un autre du XXIe siècle.

Notre analyse ne prévoyait pas l'apparition soudaine de limites, absentes un jour et incontournables le lendemain. Dans nos scénarios, l'expansion de la population et du capital physique contraint petit à petit l'humanité à consacrer davantage de capital à la résolution de problèmes nés de l'association de plusieurs limites. Au bout du compte, ces problèmes accaparent tellement de capital qu'il devient impossible d'alimenter la croissance de la production industrielle. Le déclin de l'industrie empêche alors la société d'assurer la production dans d'autres secteurs : alimentation, services et autres formes de consommation. Et lorsque ces

secteurs cessent de se développer, l'accroissement démographique s'arrête, lui aussi.

La fin de la croissance peut prendre différentes formes. Il peut y avoir effondrement, c'est-à-dire un déclin non contrôlé de la population et du bien-être humain. Les scénarios de World3 décrivent cet effondrement à travers ses différentes causes. Mais la fin de la croissance peut aussi se traduire par une adaptation en douceur de l'empreinte écologique des humains à la capacité de charge de la planète. En introduisant des changements importants dans les politiques actuelles, on peut obtenir de World3 qu'il génère des scénarios dans lesquels la croissance s'achève de façon contrôlée, puis est suivie d'une longue période de bien-être relativement élevé.

La fin de la croissance

Quelle que soit sa forme, la fin de la croissance nous semblait être une éventualité très lointaine en 1972. Tous les scénarios de World3 montraient une croissance démographique et économique qui se poursuivait bien après l'an 2000, et, même dans le scénario le plus pessimiste, le niveau de vie matériel continuait à augmenter jusqu'en 2015. Voilà pourquoi *The Limits to Growth* prévoyait que la fin de la croissance devait survenir 50 ans ou presque après sa publication. Il semblait donc encore possible de mener une réflexion, de faire des choix et d'entreprendre des actions correctives, y compris au niveau mondial.

Lorsque nous avons écrit cet ouvrage, nous espérions que ces réflexions allaient pousser la communauté internationale à prendre les mesures nécessaires pour réduire les risques d'effondrement. L'effondrement n'est pas une perspective réjouissante. Si la population et l'activité économique diminuent rapidement pour atteindre un niveau tolérable par les systèmes naturels de la planète, cela entraînera à coup sûr des problèmes de santé, des conflits, des désastres écologiques et creusera les inégalités. En effet, l'effondrement non contrôlé de l'empreinte écologique des

humains surviendrait suite à une hausse rapide de la mortalité et une baisse, rapide elle aussi, de la consommation. Un tel déclin non contrôlé peut être évité pour peu que l'on fasse les bons choix et que l'on prenne les bonnes mesures ; il n'y a pas d'effondrement si l'on s'emploie à réduire les exigences des humains vis-à-vis de la planète. La diminution progressive de l'empreinte écologique s'obtient en réduisant la fécondité et en répartissant de façon plus équitable un mode de consommation soutenable.

Il convient de répéter que la croissance ne mène pas obligatoirement à l'effondrement. Ce n'est le cas que lorsque celle-ci a entraîné un dépassement, c'est-à-dire une exploitation des ressources et des exutoires de la planète au-delà de ce qui est soutenable. En 1972, la population et l'économie mondiales semblaient toujours nettement en deçà de la capacité de charge de la planète. Nous pensions avoir le temps de poursuivre tranquillement notre croissance tout en réfléchissant à des solutions à plus long terme. Mais ce qui était sans doute vrai en 1972 ne l'était plus en 1992.

1992 : au-delà des limites

En 1992, nous avons procédé à une mise à jour de notre étude de départ et nous en avons publié les résultats dans *Beyond the Limits*. Nous avons étudié les évolutions qui s'étaient produites à l'échelle planétaire entre 1970 et 1990 et nous nous sommes servi de ces informations pour mettre à jour *The Limits to Growth* ainsi que le modèle World3. Le message principal restait identique : 20 ans plus tard, nous maintenions les mêmes conclusions qu'en 1972. Mais la version de 1992 présentait une nouvelle conclusion, d'une importance capitale : l'humanité avait déjà dépassé les limites de la capacité de charge de la planète. Ce fait nous paraissait d'ailleurs si important que nous avons choisi d'en faire le titre de l'ouvrage.

Dès le début des années 1990, il devenait de plus en plus évident que l'humanité s'aventurait toujours plus loin en territoire non durable. On apprenait ainsi que les forêts tropicales étaient

exploitées à un rythme non soutenable, on craignait que la production de céréales ne puisse plus suivre l'accroissement démographique, certains estimaient que le climat se réchauffait et on s'inquiétait de l'apparition d'un trou dans la couche d'ozone. Pour la majorité des individus, cependant, tout cela ne suffisait pas à prouver que l'humanité avait dépassé la capacité de charge de l'environnement mondial. Nous n'étions pas de cet avis. Pour nous, dès le début des années 1990, il n'était plus question d'éviter le dépassement par des politiques avisées puisque le dépassement était déjà là. La tâche principale consistait donc plutôt à « ramener » le monde en territoire soutenable. L'heure restait néanmoins à l'optimisme dans *Beyond the Limits*, car nous faisions la démonstration, scénarios à l'appui, que les dégâts causés par le dépassement pouvaient largement être résorbés en adoptant une politique internationale judicieuse et en faisant évoluer la technologie, les institutions, les objectifs politiques et les aspirations humaines.

Beyond the Limits a été publié en 1992, l'année du Sommet de la Terre à Rio. La tenue de ce sommet semblait être le signe que la société mondiale avait enfin décidé de s'attaquer sérieusement aux grands problèmes environnementaux. Mais nous savons aujourd'hui que les humains n'ont pas réussi à atteindre les objectifs de Rio. Quant au Sommet de Johannesburg, 10 ans plus tard, son bilan fut encore plus mince puisque les débats ont été quasi paralysés par des querelles idéologiques et économiques, et par les démarches de ceux qui défendaient leurs petits intérêts nationaux, privés ou individuels[5].

---

5. Voir le *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable*, Nations Unies, A/CONF.199/20, New York, 2002 (<www.un.org/french/events/wssd/pages/document.html>), qui comporte les objectifs arrêtés dans le plan de mise en œuvre ; il y est ainsi décidé de réduire de moitié d'ici 2015 la proportion de personnes qui n'ont pas accès à l'eau potable ni à des services d'assainissement, de réduire la perte mondiale de biodiversité avant 2010 et de restaurer les stocks de poissons à des niveaux permettant de produire le rendement maximal durable d'ici 2015. Malgré le niveau de préoccupation que reflètent ces objectifs, aux yeux de certaines ONG, le Sommet mondial pour le

1970 – 2000 : l'augmentation de l'empreinte écologique

De nombreux progrès ont été faits ces 30 dernières années. Face à une empreinte écologique en constante augmentation, la communauté internationale a mis en œuvre de nouvelles technologies, les consommateurs ont modifié leurs habitudes d'achat, des institutions ont été créées et des accords multinationaux ont vu le jour. Dans certaines régions, la production alimentaire, énergétique et industrielle a augmenté à un rythme tel qu'elle a largement dépassé l'accroissement démographique. Les habitants y sont devenus plus riches et le taux d'accroissement de la population a baissé suite à l'augmentation des revenus. Les individus sont beaucoup plus sensibilisés aujourd'hui aux problèmes environnementaux qu'en 1970. La plupart des pays se sont dotés d'un ministre de l'Environnement et l'éducation dans ce domaine est désormais courante. On est parvenu à éliminer la majeure partie de la pollution qui s'échappait des cheminées et des tuyaux d'évacuation des usines dans les pays industrialisés et des entreprises de premier plan œuvrent avec succès en faveur d'une plus grande éco-efficience.

Dans les années 1990, ces succès ont rendu difficile tout discours sur les problèmes liés au dépassement, difficulté accentuée par le manque de données élémentaires et même de vocabulaire de base relatif au dépassement. Il faudra attendre plus de 20 ans avant que certaines logiques – par exemple le fait de distinguer la croissance du Produit intérieur brut (PIB) et celle de l'empreinte écologique – aient suffisamment fait leur chemin pour permettre une conversation digne de ce nom sur les limites à la croissance. Et la communauté internationale est toujours aux prises avec le concept de *développement durable*, une expression qui demeure ambiguë et souvent galvaudée, 16 ans après sa création par la Commission Brundtland[6].

---

développement durable ne s'est pas concrétisé par un grand nombre d'avancées, faisant même marche arrière dans certains cas par rapport aux engagements pris à Rio 10 ans plus tôt.

6. Commission mondiale de l'environnement et du développement, *Notre avenir à tous*, Montréal, Éditions du Fleuve, 1989 ; plus connue sous le nom de

La décennie qui vient de s'écouler a largement corroboré notre thèse selon laquelle le monde est déjà en dépassement. On sait à présent que la production mondiale de céréales par habitant a atteint son maximum au milieu des années 1980. La perspective d'une importante augmentation des captures de poissons marins s'est envolée. Nous payons un tribut toujours plus lourd aux catastrophes naturelles, et la concurrence de plus en plus féroce autour des ressources d'eau douce et de combustibles fossiles provoque des tensions, voire des conflits. Les États-Unis et certaines autres grandes nations émettent toujours plus de gaz à effet de serre, bien que les scientifiques et les données météorologiques fournissent la preuve que les activités humaines modifient le climat mondial. On constate déjà un déclin économique continu dans de nombreuses régions. 54 pays représentant 12 % de la population mondiale ont enregistré une baisse du PIB par habitant pendant plus de 10 ans, soit entre 1990 et 2001[7].

On a également assisté, durant la décennie qui vient de s'écouler, à la naissance d'un nouveau vocabulaire et de nouveaux indicateurs liés au dépassement. Mathis Wackernagel et ses collègues ont ainsi mesuré *l'empreinte écologique* de l'humanité et l'ont comparée à la « capacité de charge » de la planète[8]. Ils ont défini cette empreinte écologique comme la surface de terre nécessaire pour fournir les ressources (céréales, fourrage, bois, poissons et surfaces urbaines) et absorber les émissions (dioxyde de carbone) de la société mondiale. Lorsqu'il a comparé cette surface à la quantité de terres disponibles, Wackernagel en a conclu que la consommation actuelle de ressources par les humains dépasse de

---

Commission Brundtland, du nom de sa présidente, Gro Harlem Brundtland, ex-premier ministre de Norvège. Dans *The Limits to Growth*, nous avions utilisé le terme d'« équilibre » plutôt que celui de « développement durable ».

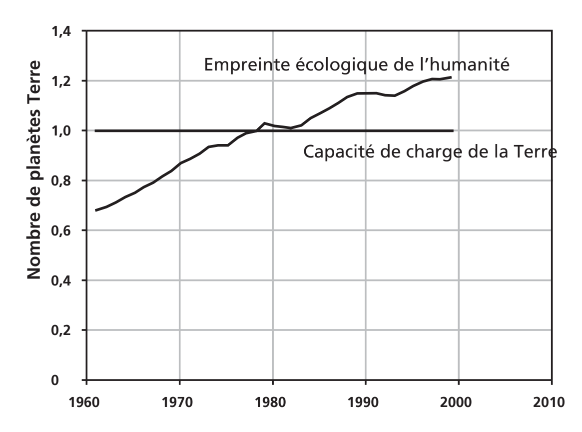
7. Banque mondiale, *Atlas de la Banque mondiale 2003-2004*, Washington, DC, 2003, p. 64-65.

8. Mathis Wackernagel *et al.*, « Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy », *Proceedings of the Academy of Science 99,* n° 14, Washington, DC, 2002, p. 9266-9271. Également disponible sur <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.142033699>.

quelque 20 % la capacité de charge mondiale (figure P-1). L'humanité aurait donc connu pour la dernière fois un niveau de vie soutenable dans les années 1980. Elle enregistre actuellement un dépassement de 20 %.

Hélas, l'empreinte écologique des humains continue à augmenter malgré les avancées technologiques et institutionnelles. C'est d'autant plus grave que l'humanité est *déjà* en territoire non soutenable. Mais peu, hélas, ont pris conscience de la gravité de la situation. Il faudra du temps pour obtenir un soutien des dirigeants afin de faire évoluer les valeurs individuelles et les politiques publiques ; or seule cette évolution permettrait d'inverser les tendances et de ramener l'empreinte écologique dans les limites de la capacité de charge à long terme de la planète.

FIGURE P-1 – Empreinte écologique contre capacité de charge



Ce graphique montre le nombre de planètes Terre nécessaires pour fournir les ressources utilisées par les humains et pour absorber leurs émissions depuis 1960. Cette demande humaine est comparée à l'approvisionnement disponible, c'est-à-dire à celui que fournit notre planète. La demande humaine se met à dépasser l'approvisionnement de la nature à partir des années 1980 et lui est supérieur d'environ 20 % en 1999. **(Source : M. Wackernagel et al.)**

Et maintenant ?

Le défi auquel la planète est confrontée peut être formulé de façon simple : pour atteindre la « durabilité », l'humanité doit augmenter la consommation des populations pauvres tout en réduisant son empreinte écologique totale. Cela requiert des avancées technologiques, un changement d'attitude de la part de chacun et des planifications à plus longue échéance. Le respect, l'attention et le partage doivent s'intensifier et traverser les frontières. Il nous faudra des dizaines d'années pour y parvenir, même si les circonstances sont très favorables. Aucun parti politique moderne n'a séduit les foules avec un tel programme, et encore moins les individus qui ont l'argent et le pouvoir, qui sont pourtant ceux-là mêmes qui pourraient permettre aux pauvres de connaître la croissance en réduisant leur empreinte écologique. Celle-ci, pendant ce temps, s'accentue de jour en jour.

C'est pourquoi nous sommes beaucoup plus pessimistes qu'en 1972 quant à l'avenir qui nous attend. Il est triste de constater que l'humanité a pour l'essentiel gâché les 30 dernières années en se perdant dans de vains débats et en apportant des réponses sincères mais timides au défi écologique mondial. Nous n'avons plus 30 ans à perdre : il va falloir procéder à de nombreux changements si nous voulons qu'au dépassement actuel ne succède pas un effondrement lors du XXIe siècle.

Nous avions promis à Dana Meadows avant son décès, début 2001, que nous mènerions à bien la « mise à jour trente ans après » de l'ouvrage qu'elle aimait tant. Mais en nous y attelant, nous avons une fois de plus été confrontés aux profondes différences qui nous séparent, nous autres auteurs, en matière d'espoirs et d'attentes.

Dana était l'optimiste forcenée du groupe. Elle croyait avec bienveillance et compassion en l'humanité. Le travail de toute sa vie reposait sur la conviction que si elle mettait assez d'informations pertinentes entre les mains des individus, ils choisiraient la voie de la sagesse, de la clairvoyance et de l'humanisme. Qu'ils

opteraient pour les politiques internationales permettant d'éviter le dépassement (ou, à défaut, qu'ils feraient en sorte que la planète s'éloigne du gouffre). Dana a passé sa vie à œuvrer pour cet idéal.

Jorgen est le cynique du groupe. Il pense que l'humanité, sourde à des signaux toujours plus clairs et plus forts, va poursuivre, jusqu'à ce qu'il soit trop tard, les objectifs à court terme que sont toujours plus de consommation, d'emplois et de sécurité financière. Il est affligé à l'idée que les humains vont intentionnellement renoncer au monde merveilleux qui aurait pu être le leur.

Dennis se situe entre les deux. Il estime que des mesures finiront par être prises afin d'éviter les pires conséquences d'un effondrement mondial. Il pense que les humains vont finalement choisir un avenir relativement soutenable, mais seulement après que de graves crises les auront contraints à des actions tardives. Et les résultats qu'ils obtiendront après avoir attendu si longtemps seront bien moins satisfaisants que ceux auxquels ils auraient pu prétendre en intervenant plus tôt. La planète aura entre-temps perdu un grand nombre de ses incroyables trésors écologiques ; de nombreuses solutions politiques et économiques séduisantes auront disparu ; des inégalités considérables persisteront, la société sera davantage militarisée et les conflits seront fréquents.

Il est impossible de réunir ces trois points de vue et d'en tirer une prévision commune pour l'avenir de la planète. Mais nous sommes d'accord sur ce que nous espérons. Les changements que nous appelons de nos vœux sont décrits dans une version légèrement mise à jour du chapitre conclusif, chapitre plein d'espoir que Dana avait écrit pour *Beyond the Limits* et que nous avons rebaptisé « Transition vers la durabilité : les outils ». Le message qu'il véhicule est que si nous persistons dans notre démarche pédagogique, les humains vont de plus en plus choisir la voie de la raison, par amour et par respect pour leurs compagnons planétaires, actuels et à venir, humains ou non. Nous espérons de tout notre cœur qu'ils s'y prendront à temps.

Avions-nous raison dans *The Limits to Growth* ?

On nous a souvent demandé si les prévisions que nous avions faites dans *The Limits to Growth* étaient correctes. Voilà bien le langage des médias, et pas le nôtre ! Car nous continuons à considérer notre travail comme une démarche visant à identifier différents futurs possibles et non comme une prévision de l'avenir. Nous ne faisons que réaliser des ébauches de scénarios alternatifs pour l'humanité d'ici 2100. Mais il est néanmoins utile de réfléchir à ce que ces 30 dernières années nous ont enseigné. Que s'est-il donc passé depuis que *The Limits to Growth*, petit livre de poche d'un éditeur inconnu de Washington, a été publié en mars 1972 ?

Au départ, la plupart des économistes ainsi que de nombreux industriels, hommes politiques et défenseurs du tiers-monde ont rué dans les brancards à l'idée qu'il puisse y avoir des limites à la croissance. Puis, différents événements sont venus prouver que le concept de limites écologiques mondiales n'était pas absurde. Il y a bel et bien des limites à la croissance physique et elles ont une influence considérable sur la réussite des politiques que nous choisissons d'adopter. L'histoire est là pour témoigner que, face à ces limites, nos sociétés ne savent que modérément imposer des mesures avisées, clairvoyantes et altruistes qui désavantagent à court terme les acteurs importants de la société.

L'annonce de contraintes relatives aux ressources et aux émissions a engendré de nombreuses crises depuis 1972, déchaînant les médias, attirant l'attention du grand public et interpellant les hommes politiques. La baisse de la production pétrolière enregistrée par certains grands pays, la dégradation de la couche d'ozone, l'élévation des températures à l'échelle planétaire, le fléau de la faim encore très présent, les débats de plus en plus vifs sur les sites d'enfouissement des déchets toxiques, la baisse des nappes phréatiques, la disparition de certaines espèces et le recul des forêts sont quelques-uns des problèmes qui ont donné lieu à des études à grande échelle, à des sommets internationaux et à des accords

au niveau mondial. Tous ces problèmes viennent étayer la conclusion fondamentale qui est la nôtre : les limites à la croissance physique constituent un aspect essentiel du débat politique mondial au XXIe siècle.

Pour ceux qui apprécient les chiffres, nous pouvons affirmer que les scénarios très agrégés de World3 continuent à être, 30 ans plus tard, d'une redoutable précision. La planète en l'an 2000 comptait le même nombre d'habitants (environ 6 milliards contre 3,9 milliards en 1972) que ce que notre scénario standard de 1972 avait prévu[9]. Ce scénario révélait en outre une augmentation de la production alimentaire mondiale (passant de 1,8 milliard de tonnes d'équivalent céréales par an en 1972 à 3 milliards en 2000) qui correspond assez bien à ce qui s'est produit[10]. Cela prouve-t-il pour autant que notre modèle était le bon ? Évidemment pas, mais cela signifie néanmoins qu'il n'était pas totalement absurde. Ses hypothèses ainsi que nos conclusions jouissent d'ailleurs toujours d'une certaine considération aujourd'hui.

Rappelons, c'est important, que lire World3 sur ordinateur n'est pas nécessaire pour comprendre ses principales conclusions. Les hypothèses les plus importantes que nous avons faites sur la probabilité d'un effondrement ne sont pas le fruit d'une confiance aveugle dans les courbes générées par World3. Elles résultent tout simplement du décryptage des schémas comportementaux dynamiques produits par trois paramètres incontournables, chroniques et classiques du système mondial : les limites érodables, la poursuite incessante de la croissance et le retard avec lequel la

9. Voir Dennis L. Meadows *et al.*, *The Dynamics of Growth in a Finite World*, *op. cit.*, p. 501 et 57, pour les chiffres donnés par *Limits to Growth*, qui correspondent à ceux de Lester Brown *et al.*, *Vital Signs 2000*, New York, W. W. Norton, 2000, p. 99.

10. Voir Dennis L. Meadows *et al.*, *The Dynamics of Growth in a Finite World*, *op. cit.*, p. 501 et 264, pour les chiffres donnés par *Limits to Growth*, qui montrent une hausse de 67 % entre 1972 et 2000, ce qui n'est pas loin des 63 % de hausse de la production mondiale de céréales mentionnés par Lester Brown *et al.*, *op. cit.*, p. 35.

société réagit lorsqu'elle approche des limites. Tout système régi par ces paramètres est prédisposé au dépassement et à l'effondrement. Les hypothèses qui sont au centre de World3 reposent sur les causes et les effets qui produisent les limites, la croissance et les retards. Or, étant donné qu'on retrouve ces causes et ces effets dans le monde réel, il n'y a rien d'étonnant à ce que ce dernier évolue selon un schéma correspondant aux principales caractéristiques des scénarios de *The Limits to Growth*.

Pourquoi un nouveau livre ?

Pourquoi se donner la peine de publier une version mise à jour de *Beyond the Limits* si les principales conclusions restent les mêmes que dans les deux ouvrages précédents ? Nous souhaitons avant tout réaffirmer notre position de 1972 d'une façon qui soit plus facile à comprendre et mieux étayée par les données et les exemples que nous avons pu recueillir ces dernières décennies. Nous souhaitons en outre fournir un matériau mis à jour aux nombreux enseignants qui utilisent nos précédents ouvrages avec leurs élèves. *Beyond the Limits* contient toujours des perspectives intéressantes sur l'avenir, mais on peut reprocher à un enseignant de se servir, au XXIe siècle, d'un texte dont les données s'arrêtent en 1990.

D'autres raisons nous poussent aussi à écrire cet ouvrage. Nous aimerions, une fois de plus,

- Souligner que l'humanité est en état de dépassement, et que les dégâts et les souffrances qui risquent d'en résulter peuvent être considérablement atténués grâce à des politiques avisées ;
- Proposer des données et des analyses qui vont à l'encontre des discours politiques actuels selon lesquels l'humanité est sur la bonne voie en ce XXIe siècle ;
- Inciter les citoyens du monde entier à réfléchir aux conséquences à long terme de leurs actions et de leurs choix, et recueillir leur soutien en faveur de mesures qui atténueraient les dégâts causés par le dépassement ;

- Faire connaître le modèle World3 à une nouvelle génération de lecteurs, d'étudiants et de chercheurs ;
- Montrer les progrès accomplis depuis 1972 dans la compréhension des causes et des conséquences à long terme de la croissance.

Scénarios et prévisions

Nous n'avons *pas* écrit ce livre dans le but de publier des prévisions sur ce qui va réellement se produire au XXI[e] siècle. Nous ne disons *pas* qu'un avenir plus qu'un autre nous attend. Nous nous contentons de présenter une série de scénarios alternatifs, 10 évolutions possibles au XXI[e] siècle. Nous le faisons dans le but de vous encourager à apprendre, à réfléchir et à définir les choix qui sont les vôtres.

Nous ne pensons pas que les données et les théories mises à notre disposition permettront un jour de prévoir avec précision l'avenir de la planète au cours du siècle. Mais nous estimons que les connaissances actuelles nous autorisent à éliminer un certain nombre d'hypothèses par trop irréalistes. Les faits excluent d'ores et déjà la possibilité d'une croissance soutenue à l'avenir, pourtant souhaitée de façon implicite par nombre d'individus ; c'est prendre ses rêves pour la réalité, c'est séduisant mais infondé, vendeur mais impossible. Notre analyse aura été utile si elle incite les habitants de cette planète à reconsidérer leur position, à s'informer et à davantage respecter les limites physiques naturelles qui vont jouer un rôle majeur dans leur existence.

Nos livres et la transition vers la durablilité

Un livre peut sembler un outil bien modeste dans le cheminement qui doit nous mener au développement durable, mais le parcours des ouvrages que nous avons publiés ne nous donne pas ce sentiment. *The Limits to Growth* et *Beyond the Limits* se sont vendus à des millions d'exemplaires. Le premier a provoqué un vaste débat et le deuxième l'a ravivé. Nous avons contribué à accentuer la prise de conscience et les préoccupations environnementales

alors que le mouvement pour la défense de la nature n'en était qu'à ses débuts. De nombreux étudiants, après avoir lu *The Limits to Growth*, ont modifié leurs objectifs professionnels et ont orienté leurs études autour de l'environnement et du développement durable. Nos livres se sont donc révélés fort utiles.

Nous avons cependant échoué à bien des égards dans notre entreprise. L'ambition première de *The Limits to Growth* et de *Beyond the Limits* était d'attirer l'attention sur le phénomène du dépassement écologique planétaire et d'inciter les humains à remettre en question la poursuite de la croissance comme solution à la plupart de nos maux. Grâce à nous, l'expression « limites à la croissance » a été largement utilisée. Hélas, elle est souvent mal comprise et généralement utilisée aujourd'hui de façon très simpliste. La majorité des critiques pensent que notre préoccupation au sujet des limites résulte du fait que les combustibles fossiles et certaines autres ressources vont bientôt être épuisés. Notre approche des limites est en réalité plus subtile que cela. Nous sommes inquiets à l'idée que les politiques actuelles engendrent un dépassement et un effondrement planétaires, faute d'efforts efficaces pour anticiper les limites écologiques et y faire face. Nous estimons que l'économie des humains dépasse déjà d'importantes limites à l'heure actuelle et que ce dépassement va considérablement s'intensifier dans les décennies à venir. Nous ne sommes pas parvenus, dans nos précédents ouvrages, à exprimer cette inquiétude de façon claire. Et nous n'avons pas réussi à faire accepter le concept de « dépassement » comme une préoccupation légitime dans le débat public.

Il est intéressant de comparer nos résultats avec ceux des autres groupes (essentiellement composés d'économistes) qui ont passé ces 30 dernières années à mettre en avant le concept de libre-échange. Contrairement à nous, ils sont parvenus à rendre ce concept familier. Contrairement à nous, ils ont converti de nombreux hommes politiques. Mais comme nous, ils se heurtent à un terrible manque de conviction et de constance dès que les politiques libre-échangistes entraînent un coût social ou local

immédiat, comme des suppressions d'emplois. On note également un grand malentendu sur l'ensemble des coûts et des avantages résultant du libre-échange. Le dépassement écologique nous semble être un concept beaucoup plus important, en ce XXIe siècle, que le libre-échange. Mais il arrive loin derrière en matière d'attention et de respect de la part du grand public. Ce livre est une nouvelle tentative pour rattraper ce retard.

Le dépassement et l'effondrement dans la pratique

Il y a dépassement, et déclin consécutif du bien-être social, lorsqu'une société ne se prépare pas suffisamment à l'avenir. Il peut y avoir perte de bien-être lorsqu'une société n'a pas prévu de produit de remplacement en cas, par exemple, de baisse des réserves pétrolières, de raréfaction du poisson sauvage, de hausse du prix des essences de bois tropical. Le problème est plus grave encore lorsque les réserves de ressources naturelles s'érodent et sont détruites lors du dépassement. À ce stade, la société peut subir un effondrement.

Nous avons assisté à une illustration frappante du dépassement et de l'effondrement à l'échelle planétaire au début du XXIe siècle, avec la « bulle Internet » sur le marché des actions. Cette bulle illustrait une dynamique d'intérêt dans le monde de la finance, mais pas dans celui des ressources physiques. La ressource érodable était la confiance des investisseurs.

Voici, en un mot, ce qui est arrivé : le cours des actions est monté de façon spectaculaire entre 1992 et mars 2000 pour atteindre ce qui, avec le recul, était un pic parfaitement non soutenable. Puis, les cours ont baissé pendant trois longues années avant d'atteindre leur niveau le plus bas en mars 2003. Ils ont ensuite fini par se rétablir petit à petit (du moins jusqu'en janvier 2004, date à laquelle nous écrivons ceci).

Comme c'est le cas lorsque l'humanité dépasse des limites en matière de ressources ou d'émissions de polluants, la longue montée du cours des actions a posé peu de problèmes. Bien au

contraire : l'enthousiasme était général lorsque les cours atteignaient de nouveaux sommets. Il est intéressant de noter que cet enthousiasme s'est poursuivi bien après que ces cours ont pénétré en territoire non durable, ce qui, rétrospectivement, semble s'être produit dès 1998. Ce n'est que longtemps après le pic, et au bout de plusieurs années d'effondrement, que les investisseurs ont commencé à admettre qu'il y avait eu une « bulle », c'est-à-dire un dépassement dans leur langage. Une fois l'effondrement lancé, personne n'a pu enrayer la chute. Et au bout de trois ans, beaucoup se demandaient si elle allait finir. La confiance des investisseurs était complètement érodée.

Nous pensons, hélas, que la planète, en matière de consommation de ressources et d'émissions de polluants, va vivre un dépassement et un effondrement identiques à ceux de la bulle Internet, mais étalés sur beaucoup plus longtemps. La phase de croissance sera bienvenue et acclamée, même lorsque nous serons depuis longtemps en territoire non soutenable (et cela, nous le savons, car c'est déjà le cas). L'effondrement sera très soudain, à la surprise générale. Et au bout de quelques années, il deviendra de plus en plus évident que la situation antérieure était totalement non soutenable. Après quelques années supplémentaires de déclin, peu croiront encore à un rétablissement. Ils penseront devoir dire adieu à l'abondance d'énergie et à la présence du poisson sauvage en quantité suffisante. Espérons qu'ils auront tort.

Des plans pour l'avenir

Il fut un temps où les limites à la croissance appartenaient à un futur éloigné. Elles sont bien là, aujourd'hui. Il fut un temps où le concept d'effondrement était inconcevable. Il fait aujourd'hui son apparition dans les discours publics, même s'il renvoie encore à une réalité lointaine, hypothétique et abstraite. Nous estimons qu'il faudra encore 10 ans pour pouvoir observer clairement les conséquences du dépassement et 20 ans pour que le dépassement soit accepté comme un état de fait. Les scénarios présentés dans

cet ouvrage, tout comme ceux de *The Limits to Growth* il y a 30 ans, montrent que la première décennie du XXIe siècle sera encore marquée par la croissance. Nos attentes pour la période 1970-2010 ne divergent donc pas encore beaucoup de celles de nos critiques. Nous devrons patienter 10 ans pour savoir qui a le mieux appréhendé l'avenir.

Janvier 2004

Dennis L. Meadows, Durham,
New Hampshire, États-Unis
Jorgen Randers, Oslo, Norvège

CHAPITRE 1

Le dépassement

L'avenir n'est plus… ce qu'il aurait pu être si les hommes avaient su exploiter plus efficacement leur intelligence et les possibilités qui s'offraient à eux. Mais il peut encore devenir ce que nous voulons qu'il soit, pour peu que nous soyons raisonnables et réalistes.

– Aurelio Peccei, 1981

On parle de dépassement lorsqu'on va trop loin, qu'on va au-delà de certaines limites de façon accidentelle, sans l'avoir voulu. Nous sommes tous les jours confrontés à des dépassements. Lorsqu'on se lève trop vite d'une chaise, on peut perdre l'équilibre. Lorsqu'on tourne trop le robinet d'eau chaude de la douche, on peut se brûler. Sur une route verglacée, on peut glisser et ne pas pouvoir s'arrêter au stop. Lors d'une fête, on boit parfois plus d'alcool que notre corps ne peut raisonnablement en métaboliser, et le lendemain, on se réveille avec un terrible mal de tête. Il arrive régulièrement que des entreprises de construction bâtissent plus d'immeubles qu'il ne leur a été demandé, si bien qu'elles doivent vendre chaque unité moins cher que sa valeur et risquent la faillite. On construit souvent trop de bateaux de pêche, et la flotte, trop importante, attrape beaucoup trop de poissons pour que la pêche soit durable. Les ressources halieutiques se mettent

alors à diminuer, ce qui oblige les bateaux à rester au port. Les entreprises de produits chimiques ont fabriqué plus de composés chlorés que la haute atmosphère ne pouvait en assimiler. Résultat : la couche d'ozone va demeurer sérieusement endommagée pour encore plusieurs dizaines d'années, le temps que la quantité de chlore baisse dans la stratosphère.

Les trois conditions d'un dépassement sont toujours les mêmes, que ce soit au niveau individuel ou planétaire. Tout d'abord, il y a croissance, accélération et changement rapide. Ensuite, on se trouve face à une forme de limite ou de barrière que le système en mouvement ne peut franchir sans risque. Enfin, il y a soit retard soit erreur dans la prise de conscience et dans la mise en place de mesures destinées à maintenir le système en deçà des limites. Ces trois conditions sont nécessaires et suffisantes pour qu'il y ait dépassement.

Le dépassement est un phénomène ordinaire qui se présente sous toutes les formes possibles ou presque. Il peut s'agir d'un changement physique, comme l'augmentation de la consommation de pétrole ; d'un changement organisationnel, comme l'augmentation du nombre de personnes à diriger ; d'un changement psychologique, comme le fait de réviser sans cesse à la hausse ses objectifs en matière de consommation. Il peut aussi s'agir d'un changement financier, biologique, politique ou autre.

Les limites aussi sont très diverses : elles peuvent être imposées par une certaine quantité d'espace ou de temps, ou par les paramètres physiques, biologiques, politiques, psychologiques ou autres d'un système.

Les retards ont eux aussi de multiples causes. Ils peuvent être la conséquence d'une inattention, de données erronées, d'informations obtenues trop tard, de réflexes ralentis, d'une bureaucratie lente et compliquée, d'une théorie inexacte sur les réactions du système, ou d'une dynamique qui empêche d'arrêter rapidement le système, en dépit de tous les efforts. Par exemple, il peut y avoir retard lorsqu'un conducteur ne réalise pas dans quelle mesure le verglas réduit l'efficacité de son freinage ; l'entrepreneur s'appuie

sur des prix à l'instant T pour prendre des décisions qui ne vont affecter le marché que deux ou trois ans plus tard ; les propriétaires de navires de pêche déterminent leur activité en fonction des prises récentes et non en fonction d'informations sur le taux de reproduction à venir des poissons ; il faut des années pour que les produits chimiques migrent de l'endroit où ils sont utilisés vers un point de l'écosystème où ils causent de graves dégâts.

Dans la plupart des cas, le dépassement est sans conséquence. Le franchissement d'un grand nombre de limites est le plus souvent sans risque et se produit suffisamment souvent pour que, lorsqu'il y a danger potentiel, on ait appris à l'éviter ou à en réduire les conséquences. On passe ainsi sa main sous l'eau avant d'entrer dans la douche. Des dégâts peuvent se produire, mais ceux-ci sont rapidement combattus : la plupart des individus essaient de dormir tard le lendemain lorsqu'ils sont restés à boire dans un bar la veille.

Il arrive cependant que les conséquences du dépassement puissent être catastrophiques. La croissance de la population et de l'économie matérielle au niveau mondial fait courir ce risque à l'humanité. C'est le sujet de ce livre.

Tout au long de cet ouvrage, nous allons tenter de comprendre et de décrire pourquoi, et avec quelles conséquences, une population et une économie ont crû jusqu'à désormais dépasser la biocapacité de notre planète. Il s'agit de problèmes complexes. Les données pertinentes sont souvent de piètre qualité et incomplètes. Les conclusions scientifiques ne font pas encore l'objet d'un consensus au sein des chercheurs et encore moins au sein des politiques. Nous avons cependant besoin d'un terme pour décrire la relation entre ce que l'humanité exige de la planète et ce que cette dernière peut lui fournir. Nous utiliserons à cet effet le terme d'*empreinte écologique*.

Ce terme a été popularisé par une étude que Mathis Wackernagel et ses collègues ont menée en 1997 pour le compte du Conseil de la Terre. Wackernagel y calcule la quantité de terres nécessaires pour fournir les ressources naturelles consommées

par différents pays et pour absorber leurs déchets[1]. Le terme inventé par Wackernagel, ainsi que son approche mathématique, ont par la suite été adoptés par le World Wide Fund for Nature (WWF) qui donne des informations sur l'empreinte écologique de plus de 150 pays dans son *Rapport Planète Vivante*[2]. Selon ces données, depuis la fin des années 1980, les humains puisent trop dans la production annuelle de ressources de la Terre pour que celle-ci puisse, dans le même temps, régénérer ces ressources. En d'autres termes, l'empreinte écologique de la société mondiale dépasse la biocapacité de la Terre. De nombreuses données viennent étayer cette conclusion et feront l'objet du chapitre 3.

Les conséquences potentielles de ce dépassement sont terriblement dangereuses. La situation actuelle est sans précédent : elle met l'humanité aux prises avec toute une série de problèmes auxquels notre espèce n'a jamais été confrontée à l'échelle planétaire. Le recul, les normes culturelles, l'habitude et les institutions nous font défaut pour y faire face. Et il faudra, dans bien des cas, des siècles, voire des millénaires, pour réparer les dégâts causés.

Mais les conséquences ne sont pas nécessairement catastrophiques, car un dépassement peut déboucher sur deux types de résultats. Le premier est un accident, quel qu'il soit. Le second, un revirement délibéré, une rectification, une prudente atténuation. Nous allons étudier ces deux possibilités offertes à l'humanité et à la planète qui la fait vivre. Nous pensons qu'une rectification est possible et qu'elle pourrait nous conduire vers un futur souhaitable, durable et suffisant pour tous les peuples du monde. Mais nous pensons également que si une rectification en profondeur

1. Mathis Wackernagel *et al.*, « Ecological Footprints of Nations: How Much Nature Do They Use ? How Much Nature Do They Have ? », Xalapa, Mexique, Centro de Estudios para la Sustentabilidad (Centre d'études sur la durabilité), 10 mars 1997. Voir également Mathis Wackernagel *et al.*, « Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy », *op. cit.* Également disponible sur : <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.142033699>.

2. WWF, *Rapport Planète Vivante 2002*, Gland, Suisse, WWF, 2002.

n'intervient pas rapidement, il se produira à coup sûr un accident que beaucoup de nos contemporains subiront.

Voilà des affirmations de taille. Comment en sommes-nous arrivés là ? Ces 30 dernières années, nous avons travaillé avec de nombreux collègues pour comprendre les causes et les conséquences à long terme de la croissance démographique et de l'augmentation de l'empreinte écologique des humains. Pour traiter ces questions, nous avons utilisé quatre approches différentes, c'est-à-dire quatre types de lentilles grossissantes pour examiner les données de diverses façons, un peu comme la lentille d'un microscope et celle d'un télescope donnent des perspectives différentes. Trois de ces dispositifs d'observation sont fréquemment utilisés et faciles à décrire : il s'agit premièrement des théories scientifiques et économiques classiques sur le système mondial ; deuxièmement, des données sur les ressources planétaires et l'environnement ; et troisièmement, d'un modèle informatique nous permettant d'intégrer ces données et de faire une projection de leurs implications. Ce livre explique principalement comment nous avons utilisé ces trois dispositifs, et ce qu'ils nous ont permis de voir.

Le quatrième dispositif est notre « vision du monde », c'est-à-dire un ensemble interne et cohérent de croyances, d'attitudes et de valeurs, un paradigme, une approche fondamentale de la réalité. Tout le monde en possède une. Elle influe sur la direction de notre regard et sur ce que nous voyons. Elle fonctionne comme un filtre ; elle laisse passer les informations qui vont dans le sens de nos attentes (souvent subconscientes) concernant la nature du monde, et nous conduit, en revanche, à ne pas retenir celles qui bousculent ou contredisent ces attentes. Lorsqu'on regarde à travers un filtre comme à travers une vitre colorée, on voit véritablement *au travers*, on ne voit pas le filtre en *lui-même*. Il en va de même avec notre vision du monde. On n'a pas besoin de la décrire à qui la partage, et il est difficile de la décrire aux autres. Mais il est absolument essentiel de garder à l'esprit que n'importe quel livre, n'importe quel modèle informatique, n'importe quelle

déclaration publique est au moins autant façonné par la vision du monde de son auteur que par des données ou une analyse « objectives ».

Si nous ne pouvons échapper à notre vision du monde, nous pouvons néanmoins essayer d'en décrire les principales caractéristiques à nos lecteurs. Elle a été forgée par les sociétés occidentales industrialisées dans lesquelles nous avons grandi, par notre formation scientifique et économique et par les enseignements que nous avons pu tirer de nos voyages et de nos activités professionnelles à travers le monde. Mais le point le plus important dans notre vision du monde, et le moins communément partagé, est notre vision systémique.

À l'instar de tout panorama comme celui qu'on a depuis le sommet d'une colline, une vision systémique permet de voir des choses qu'on n'aurait pas vues depuis un autre point de vue, mais elle peut aussi empêcher d'en voir d'autres. La formation que nous avons reçue a mis l'accent sur les systèmes dynamiques, sur des ensembles d'éléments matériels et immatériels interconnectés qui évoluent avec le temps. Elle nous a appris à voir le monde comme un ensemble de configurations comportementales en constante action, comme la croissance, le déclin, l'oscillation et le dépassement. Elle nous a appris à nous intéresser davantage aux rapports entre les éléments d'un système qu'aux éléments eux-mêmes. Nous considérons les nombreux éléments constitutifs de la démographie, de l'économie et de l'environnement comme *un seul et unique système planétaire* aux innombrables interactions. Nous voyons des stocks, des flux, des rétroactions et des limites dans les interrelations, et tout cela influe sur la façon dont le système va se comporter à l'avenir et donc sur les mesures que nous pourrions prendre pour modifier son comportement.

Cette vision systémique n'est en aucune façon la seule approche pertinente du monde, mais elle est, selon nous, particulièrement enrichissante. Elle nous permet d'aborder les problèmes différemment, et de découvrir des solutions dont nous ne soupçonnions pas l'existence. Nous avons l'intention de vous faire

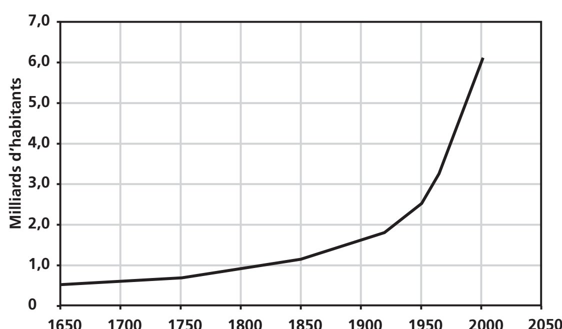
partager certains concepts de cette vision dans ce livre, ce qui vous permettra de voir ce que nous voyons et de tirer vos propres conclusions quant à l'état du monde et aux choix qui s'offrent à nous pour l'avenir.

La structure de cet ouvrage suit la logique de notre analyse des systèmes globaux. Nous avons déjà posé les bases : il y a dépassement quand il y a tout à la fois changement rapide, limites à ce changement et erreurs ou retard dans l'appréciation de ces limites et dans le contrôle de ce changement. Nous allons donc examiner la situation mondiale dans cet ordre : tout d'abord, les facteurs qui produisent un changement global rapide, puis les limites planétaires, enfin les processus grâce auxquels l'humanité prend connaissance de ces limites et y réagit.

Nous commencerons, dans le prochain chapitre, par le phénomène du changement. Au niveau mondial, les changements surviennent aujourd'hui à un rythme encore inégalé dans l'histoire de notre espèce. Ils sont avant tout le résultat d'une croissance exponentielle de la population comme de l'économie matérielle. La croissance est la caractéristique dominante du système socioéconomique mondial depuis plus de 200 ans. On peut ainsi constater grâce à la figure 1-1 que la croissance de la population dans le monde continue à augmenter malgré la baisse des taux de natalité. La figure 1-2 montre que la production industrielle augmente elle aussi, même si l'on constate des creux dus aux chocs pétroliers, au terrorisme, aux épidémies et à d'autres phénomènes à court terme. La production industrielle a augmenté plus vite que la population, ce qui a entraîné une élévation du niveau de vie matériel moyen.

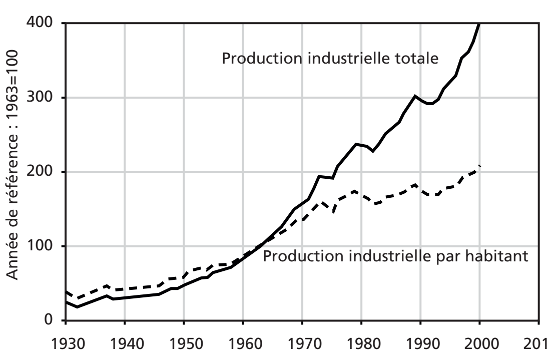
La croissance démographique et industrielle a provoqué, entre autres, la modification de plusieurs caractéristiques du système planétaire. La pollution augmente ainsi à plusieurs niveaux. L'un d'eux, important, est pointé par la figure 1-3 : l'accumulation dans l'atmosphère du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre résultant de la combustion de combustibles fossiles et de la déforestation, toutes deux anthropiques.

FIGURE 1-1 – La population mondiale



La population mondiale augmente de façon exponentielle depuis le début de la révolution industrielle. Notez la forme de la courbe et le changement qui s'accentue avec le temps : ils sont caractéristiques d'une croissance exponentielle. Cet accroissement démographique est cependant en train de ralentir ; la courbe devient donc moins verticale, mais c'est à peine visible. En 2001, le taux d'accroissement démographique mondial était de 1,3 % par an, ce qui signifie que la population double en 55 ans. **(Sources : PRB ; Nations Unies ; D. Bogue)**

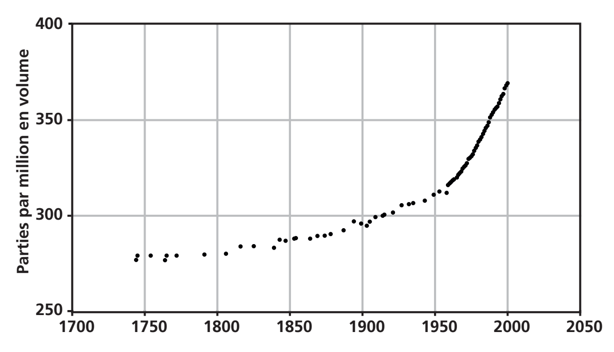
FIGURE 1-2 – La production industrielle mondiale



Si l'on prend pour référence l'année 1963, la production industrielle mondiale affiche une croissance clairement exponentielle, malgré certaines fluctuations dues aux chocs pétroliers et à des crises financières. Le taux de croissance au cours des 25 dernières années a été en moyenne de 2,9 % par an (il a doublé en 25 ans). Le taux de croissance par habitant a, en revanche, été plus lent à cause de l'accroissement démographique : seulement 1,3 % par an (il a doublé en 55 ans). **(Sources : Nations Unies ; PRB)**



FIGURE 1-3 – Concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère



La concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère est passée d'environ 270 parties par million (ppm) à plus de 370 ppm et continue à augmenter. Les causes de cette accumulation de CO_2 sont avant tout l'utilisation de combustibles fossiles et la déforestation anthropiques. Cela se traduit par un changement climatique au niveau mondial. **(Sources : PNUE, Département américain de l'Énergie)**

D'autres graphiques illustrent tout au long de cet ouvrage la croissance de la production alimentaire, des populations urbaines, de la consommation énergétique, de l'utilisation de matériaux, et bien d'autres manifestations physiques de l'activité humaine sur Terre. Tout n'augmente pas à la même vitesse ni de la même façon. Comme on peut le voir grâce au tableau 1-1, les taux de croissance varient du tout au tout. Certains ont ralenti, mais continuent à entraîner une augmentation annuelle substantielle de la variable de départ. Un taux de croissance en baisse continue bien souvent à donner une augmentation plus importante en valeur absolue lorsqu'il est multiplié par une valeur de référence beaucoup plus élevée. C'est le cas pour 8 des 14 facteurs du tableau 1-1. Au cours des 50 dernières années, les êtres humains ont multiplié par 2, 4, 10, voire plus, leurs effectifs, leurs possessions physiques et les flux de matière et d'énergie qu'ils utilisent, et ils espèrent que cette croissance va se poursuivre.

TABLEAU 1-1 – Croissance mondiale de la population humaine et de certaines activités d'origine anthropique 1950-2000

	1950	Évolution sur 25 ans	1975	Évolution sur 25 ans	2000
Population mondiale (en millions)	2 520	160 %	4 077	150 %	6 067
Véhicules immatriculés (en millions)	70	470 %	328	220 %	723
Consommation de pétrole (en millions de barils par an)	3 800	540 %	20 512	130 %	27 635
Consommation de gaz naturel (en milliards de m^3 par an)	184	680 %	1 251	210 %	2 627
Consommation de charbon (en millions de tonnes par an)	1 400	230 %	3 300	150 %	5 100
Capacité de production d'électricité (en millions de kilowatts)	154	1 040 %	1 606	200 %	3 240
Production de maïs (en millions de tonnes par an)	131	260 %	342	170 %	594
Production de blé (en millions de tonnes par an)	143	250 %	356	160 %	584
Production de riz (en millions de tonnes par an)	150	240 %	357	170 %	598
Production de coton (en millions de tonnes par an)	5,4	230 %	12	150 %	18
Production de pâte à papier (en millions de tonnes par an)	12	830 %	102	170 %	171
Production de fer (en millions de tonnes par an)	134	350 %	468	120 %	580
Production d'acier (en millions de tonnes par an)	185	350 %	651	120 %	788
Production d'aluminium (en millions de tonnes par an)	1,5	800 %	12	190 %	23

(Sources : PRB ; American Automobile Manufactures Association ; Ward's Motor Vehicle Facts & Figures ; Département américain de l'Énergie ; Nations Unies ; FAO ; CRB)

Les individus sont favorables aux politiques tournées vers la croissance, car ils pensent que celle-ci est synonyme pour eux d'augmentation du bien-être. Les États, de leur côté, recherchent la croissance, car ils la considèrent comme un remède à tous les maux ou presque. Dans les pays riches, on pense qu'elle est nécessaire à l'emploi, à l'ascension sociale et au progrès technique. Dans les pays en développement, elle est perçue comme le seul moyen de sortir de la pauvreté. Beaucoup de gens pensent en outre que la croissance permet de fournir les ressources nécessaires à la protection et à l'amélioration de l'environnement. Les États comme le patronat se démènent pour produire toujours plus de croissance.

Pour toutes ces raisons, la croissance est donc devenue un phénomène qu'il convient de fêter, comme en témoignent plusieurs de ses synonymes : *développement, progrès, avancée, gains, amélioration, prospérité, réussite.*

Voici les causes psychologiques et institutionnelles de la croissance. Il existe également ce que les tenants de l'approche systémique appellent les raisons *structurelles*, qui sont à chercher dans les relations entre les éléments démographiques et économiques d'un système. Le chapitre 2 de cet ouvrage aborde ces causes structurelles et expose leurs implications. Nous verrons pourquoi la croissance domine à ce point le système mondial.

La croissance est certes capable de résoudre certains problèmes, mais elle peut en créer d'autres. À cause des limites, le sujet du chapitre 3. La Terre a des limites finies. L'augmentation de tout ce qui est physique, comme par exemple des habitants, des voitures, des maisons et des usines, ne peut pas continuer indéfiniment. Mais il ne s'agit pas de limites en termes de nombre d'habitants, de voitures, de maisons ou d'usines, du moins pas directement. Il s'agit de limites s'appliquant au *débit*, c'est-à-dire aux flux continus d'énergie et de matière nécessaires pour que les humains, les voitures, les maisons et les usines puissent continuer à fonctionner. Ce sont des limites qui s'appliquent au rythme auquel l'humanité peut extraire des ressources (cultures, pâtu-

rages, bois, poisson) et produire des déchets (gaz à effet de serre, substances toxiques) sans dépasser les capacités de production et d'absorption de la planète.

La Terre fournit à la population et à l'économie de l'air, de l'eau, des aliments, de la matière et des combustibles fossiles, et reçoit en retour des déchets et de la pollution. Parmi les sources, on compte les gisements, les nappes aquifères et les substances nutritives du sol ; parmi les exutoires figurent l'atmosphère, les eaux de surface et les décharges. Deux facteurs en se combinant définissent les limites à la croissance : la limite des sources et la limite des exutoires présents sur Terre.

Dans le chapitre 3, nous examinerons l'état des sources et des exutoires de la planète, et nous apprendrons une bonne et une mauvaise nouvelle.

GRAPHIQUE 1



La mauvaise nouvelle est que de nombreuses sources cruciales sont en train de se tarir ou de se dégrader et que de nombreux exutoires sont presque remplis, voire débordent déjà. *Les flux de matière et d'énergie générés par l'économie humaine ne pourront pas rester très longtemps encore à leur niveau actuel.* Certaines sources et certains exutoires sont d'ores et déjà tellement mis à contribution qu'ils limitent la croissance, par exemple en augmentant les coûts, en aggravant la pollution ou en faisant monter le taux de mortalité.

La bonne nouvelle est que ce niveau élevé de flux de matière et d'énergie n'est pas nécessaire pour assurer un niveau de vie décent à tous les habitants de la planète. On pourrait réduire notre empreinte écologique en réduisant le nombre d'habitants, en modifiant nos habitudes de consommation ou en développant

des technologies plus économes en ressources. De tels changements sont possibles. Les humains disposent du savoir nécessaire pour garantir une quantité appropriée de produits finis et de services tout en réduisant considérablement la pression sur la planète. En théorie, il existe de nombreuses façons de ramener l'empreinte écologique des humains en deçà des limites de notre planète.

Mais la théorie n'est pas toujours mise en pratique. Les changements et les choix qui nous permettraient de réduire notre empreinte ne sont pas mis en œuvre, en tout cas pas assez vite pour réduire la charge grandissante qui pèse sur les sources et les exutoires. Pourquoi ? Parce qu'il n'y a pas de pression immédiate en ce sens et parce que leur mise en œuvre prend du temps. C'est le sujet du chapitre 4. Nous y étudions les signes avant-coureurs du dépassement et nous examinons la vitesse à laquelle humains et institutions peuvent réagir.

Dans le chapitre 4, nous en venons à notre modèle informatique, World3. Il nous permet d'assembler de nombreuses données et théories, et d'obtenir à partir des différents paramètres – croissance, limites, temps de réaction – un tableau explicite et cohérent. Notre modèle nous fournit aussi un outil pour mesurer les conséquences des phénomènes actuels. Nous voyons ce qui se passe lorsque l'ordinateur simule l'évolution du système dans l'hypothèse où aucun changement en profondeur ne serait décidé et où aucun effort particulier ne serait fait pour anticiper, améliorer les signaux ou résoudre les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques.

Selon tous les scénarios ou presque, le résultat de ces simulations est le dépassement et l'effondrement de l'économie et de la population de la planète.

Mais tous les scénarios ne mènent pas à l'effondrement. Dans le chapitre 5, nous exposons le plus bel exemple montrant que l'humanité sait se projeter dans l'avenir, pressentir une limite et faire marche arrière pour éviter la catastrophe. Nous décrivons la réaction de la communauté internationale lorsqu'elle a appris,

dans les années 1980, que la couche d'ozone stratosphérique était en train de se détériorer. Cette histoire est importante pour deux raisons. Elle offre tout d'abord un magnifique démenti à cette idée cynique et répandue selon laquelle les peuples, les gouvernements et les entreprises n'arrivent jamais à coopérer pour résoudre des problèmes planétaires nécessitant prévoyance et autodiscipline. Elle est ensuite l'illustration parfaite des trois conditions nécessaires au dépassement : croissance rapide, limites, et retard dans les réactions, tant scientifiques que politiques.

L'histoire de la déplétion de la couche d'ozone et des mesures prises par l'humanité nous semble aujourd'hui édifiante, mais il faudra attendre encore plusieurs décennies avant de pouvoir en lire le dénouement. Elle nous apprend beaucoup sur la difficulté qu'il y a, au sein d'un entrelacs de systèmes planétaires, à mettre la complexe entreprise humaine sur la voie de la durabilité, tout en s'appuyant sur une compréhension imparfaite et des signaux envoyés avec retard, dans un monde qui évolue à toute vitesse.

Dans le chapitre 6, nous utilisons l'ordinateur dans son but d'origine, c'est-à-dire non pour qu'il nous dise ce que les politiques actuelles vont donner, mais ce qui *pourrait* se produire si nous procédions à plusieurs changements. Nous intégrons pour cela au modèle World3 certaines hypothèses relatives à l'ingéniosité des humains. Nous nous concentrons sur deux mécanismes de résolution des problèmes, la technologie et les marchés, dans lesquels de nombreuses personnes croient profondément. World3 contient déjà d'importantes caractéristiques de ces deux formidables outils de réaction de l'humain, mais nous en ajoutons d'autres dans le chapitre 6. Nous explorons ce qui se passerait si la société mondiale décidait de véritablement allouer ses ressources au contrôle de la pollution, à la préservation des terres, à la santé des humains, au recyclage des matériaux et à une utilisation bien plus efficiente des ressources.

Nous découvrirons à partir des scénarios produits par World3 que ces mesures sont très efficaces. Mais elles ne sont pas suffisantes, car les réactions liées à la technologie et au marché sont

tardives et imparfaites. Elles prennent du temps, sont coûteuses, nécessitent des flux de matière et d'énergie et peuvent être réduites à néant par la croissance démographique et économique. Le progrès technique et la flexibilité du marché seront nécessaires pour éviter un effondrement et façonner un monde durable, mais ne suffiront pas. Il faudra autre chose. C'est le sujet du chapitre 7.

Dans ce chapitre, nous nous servons de World3 pour étudier ce qui se produirait si le monde industriel ajoutait la sagesse à l'intelligence. Nous partons du principe qu'il adopterait une nouvelle approche de ce qui est considéré comme *suffisant* et agirait en conséquence, à la fois dans le secteur de la consommation matérielle et dans celui de la démographie. Ces changements, auxquels s'ajoutent ceux, techniques, du chapitre 6, font qu'un monde peuplé d'environ 8 milliards de personnes serait durable, d'après nos simulations. Ces 8 milliards d'individus atteindraient tous un niveau de vie correspondant à peu près à celui qui prévaut actuellement dans les pays d'Europe à faibles revenus. En tablant sur une efficience du marché et un progrès technique raisonnables, les flux de matière et d'énergie nécessaires à ce monde pourraient être indéfiniment garantis par la planète. Nous montrons donc dans ce chapitre qu'il est possible de remplacer tranquillement le dépassement par la durabilité.

La durabilité est un concept tellement étranger à nos cultures obsédées par la croissance que nous prenons le temps, dans le chapitre 7, de la définir, et d'expliquer ce que pourrait être un monde durable et ce qu'il ne devrait pas être. Il n'y a selon nous aucune raison pour que, dans un monde durable, des individus vivent dans la pauvreté. Au contraire, nous pensons qu'il doit assurer à tous la sécurité matérielle. Une société durable n'est pas une société immobile, ennuyeuse, uniforme ou rigide. Ce n'est pas, et cela ne peut sans doute pas être, une société contrôlée par un pouvoir central ni une société autoritaire. C'est un monde dans lequel on aurait le temps, la possibilité et la volonté de corriger ses erreurs, et d'innover et de préserver la fertilité des écosystèmes. Un monde qui pourrait s'attacher à améliorer avec

intelligence la qualité de la vie plutôt que de s'entêter à augmenter la consommation matérielle et le stock de capital physique.

Les conclusions que nous tirons dans le chapitre 8 émanent davantage de nos modèles mentaux que de données ou d'un modèle informatique. Elles sont le résultat des tentatives que nous avons faites pour comprendre les mesures qui doivent être prises aujourd'hui. World3, notre modélisation du monde, laisse la porte ouverte au pessimisme comme à l'optimisme en ce qui concerne l'avenir. Les auteurs de cet ouvrage ne sont pas d'accord à ce sujet. Dennis et Jorgen sont arrivés à la conclusion qu'une baisse de la qualité de vie moyenne est désormais inévitable et que la croissance de la population et de l'économie mondiales va sans doute devoir ralentir. Donella, en revanche, a toujours été persuadée que l'humanité va un jour se doter des idées, des institutions et de l'éthique nécessaires pour instaurer une société plaisante et durable. Malgré nos divergences de points de vue, nous sommes tous les trois d'accord sur la façon dont les difficultés doivent être traitées, et c'est aussi l'objet du chapitre 8.

Dans la première partie de ce chapitre, nous exposons les actions prioritaires qui permettraient d'atténuer les dommages causés à la planète et à la société. Dans la seconde, nous présentons cinq outils qui peuvent aider notre société mondiale à se diriger vers la durabilité.

Quel que soit ce qui nous attend, nous savons que cela se produira principalement durant les deux prochaines décennies. L'économie mondiale a déjà tellement dépassé les limites soutenables qu'il faudra renoncer rapidement à l'utopie d'une planète infinie. Cet ajustement face à la situation sera une tâche gigantesque, nous en sommes conscients. Nous vivrons une révolution aussi profonde que les révolutions agricoles et industrielles. Nous savons qu'il est difficile de résoudre des problèmes tels que la pauvreté et le chômage, que le monde entier a jusqu'ici espéré combattre par la croissance. Mais nous savons également que compter sur la croissance, c'est se tromper de solution, car elle n'est pas durable. La poursuite aveugle d'une croissance physique

dans un monde fini ne fait qu'aggraver la plupart des problèmes. Il existe de bien meilleures solutions.

La majeure partie de ce que nous avons écrit dans *The Limits to Growth* il y a 30 ans reste vraie aujourd'hui. Mais la science et la société ont toutes deux évolué en 30 ans, nous avons tous beaucoup appris et de nouvelles perspectives se sont offertes à nous. Les données, l'informatique et notre propre expérience nous montrent que les chemins qui pouvaient nous conduire vers l'avenir sont plus étroits aujourd'hui qu'en 1972, lorsque nous avons pour la première fois étudié les limites à la croissance. Les niveaux de richesse qu'aurait pu connaître de façon durable l'ensemble de la population mondiale sont hors de portée aujourd'hui, les écosystèmes que nous aurions pu préserver sont exsangues et les ressources qui auraient pu faire la richesse des générations futures ont été consommées. Mais un large éventail de choix s'offre toujours à nous et ces choix sont déterminants. La figure 1-4 illustre les vastes possibilités qui subsistent. Nous l'avons obtenue en superposant les courbes de la population humaine et du bien-être humain générées par les neuf scénarios informatiques pertinents que nous présentons plus loin dans cet ouvrage[3].

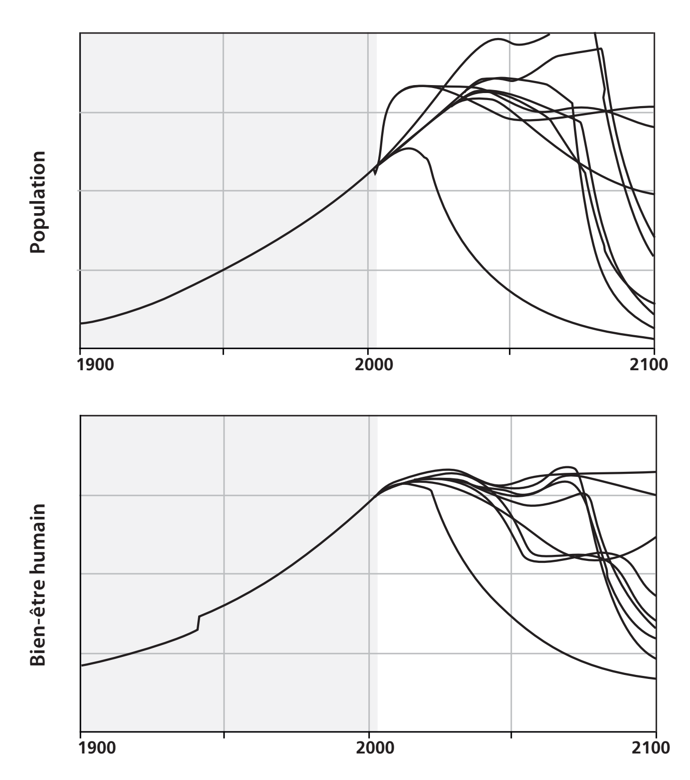
L'ensemble des futurs possibles prennent des voies différentes. Il pourrait y avoir un effondrement soudain, mais aussi une transition en douceur vers la durabilité. Une croissance illimitée des flux physiques est en revanche impossible. Cela ne peut pas être une solution sur une planète finie. Le seul véritable choix est de ramener ces flux qui soutiennent les activités humaines à des niveaux durables soit volontairement, grâce à notre technologie et à nos capacités d'organisation, soit forcés par la nature, à cause du manque de nourriture, d'énergie, de matériaux et au prix d'un environnement de plus en plus malsain.

---

3. La comparaison prend en compte tous les scénarios sauf deux (scénarios 0 et 10), scénarios qui illustrent des mondes purement hypothétiques.



FIGURE 1-4 – Différents scénarios concernant la population mondiale et le bien-être



Sur ces graphiques, tous les scénarios pertinents proposés par World3 et présentés dans ce livre sont superposés afin d'illustrer la grande variété de configurations possibles concernant deux variables importantes : la population et le bien-être humain moyen (mesuré au moyen d'un indice qui associe le revenu par habitant à d'autres indicateurs du bien-être). La plupart des scénarios montrent un déclin, mais certains sont le reflet d'une société qui parvient à stabiliser sa population et à présenter un bien-être humain élevé et durable.

En 1972, *The Limits to Growth* s'ouvrait sur cette citation de U Thant, alors Secrétaire général des Nations Unies :

> *Je ne voudrais pas paraître exagérément négatif, mais je ne peux que conclure, d'après les informations qui sont à ma disposition en tant que Secrétaire général, que les membres des Nations Unies ont peut-être encore devant eux une dizaine d'années pour mettre de côté leurs vieilles querelles et lancer un partenariat international afin de freiner la course aux armements, d'améliorer l'environnement humain, de désamorcer l'explosion démographique et de trouver la dynamique nécessaire aux efforts de développement. Si un tel partenariat mondial ne voit pas le jour au cours de la prochaine décennie, je crains fort que les problèmes que je viens d'énumérer ne prennent d'ici là des proportions telles que nous ne serons plus en mesure de les contrôler*[4].

Plus de 30 ans après, il n'y a toujours pas trace d'un partenariat mondial. Mais le consensus grandit quant au fait que l'humanité se trouve face à des problèmes qui la dépasse. Et un grand nombre de données ainsi que de nombreuses études récentes vont dans le sens de la mise en garde du Secrétaire général.

Les préoccupations de U Thant ont ainsi été reprises dans un rapport de 1992 intitulé « World Scientists' Warning to Humanity » et signé par plus de 1 600 scientifiques issus de 70 pays, parmi lesquels 102 prix Nobel :

> *Les êtres humains et le monde naturel risquent d'entrer en collision. En effet, les activités humaines provoquent des dégâts terribles et souvent irréversibles sur l'environnement et sur des ressources capitales. Si nous ne faisons rien, nombre de nos pratiques actuelles vont sérieusement mettre en danger l'avenir que nous souhaitons à l'humanité et aux règnes végétal et animal ; elles pourraient à ce point transformer le vivant que nous ne serions plus en mesure de mener la vie que nous connaissons actuellement. Il faut d'urgence opérer des changements en profondeur si nous voulons éviter la collision que notre comportement risque de provoquer*[5].

---

4. U Thant, 1969.
5. « World Scientists' Warning to Humanity », décembre 1992, disponible sur <www.ucsusa.org/about/1992-world-scientists.html>.

La mise en garde de U Thant a même reçu le soutien d'un rapport paru en 2001 et rédigé au sein de la Banque mondiale :

> *On constate que l'environnement se dégrade à un rythme alarmant qui, dans certains cas, s'accélère.* […] *Partout dans le monde en développement, les problèmes environnementaux ont un coût humain, économique et social très élevé et menacent les fondements sur lesquels reposent la croissance et finalement notre survie*[6].

U Thant avait-il raison ? Les problèmes que connaît la planète aujourd'hui échappent-ils à tout contrôle ? Ou est-il allé un peu vite en besogne ? Et, dans ce cas, cette déclaration optimiste de la Commission mondiale de l'environnement et du développement en 1987 est-elle plus exacte ?

> *Le genre humain a parfaitement les moyens d'assumer un développement durable, de répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs*[7].

Personne ne peut vous répondre avec certitude. Pourtant, il est urgent que chacun élabore des réponses réfléchies aux questions posées ci-dessus, pour pouvoir interpréter les événements à venir et pour orienter nos actions et nos choix, jour après jour.

Nous vous invitons à nous accompagner dans ce débat sur les données, les analyses et les idées que nous avons accumulées depuis 30 ans. Vous disposerez alors des bases nécessaires pour tirer vos propres conclusions sur les futurs de notre planète et pour faire les choix qui guideront votre existence.

---

6. « Making Sustainable Commitments : An Environment Strategy for the World Bank » (document de travail), Washington, DC, Banque mondiale, 17 avril 2001.

7. Commission mondiale de l'environnement et du développement, *Notre avenir à tous, op. cit.*

CHAPITRE 2

Le moteur : la croissance exponentielle

Je me suis aperçu avec horreur que je n'avais pas été exempt de naïveté à l'égard des fonctions exponentielles… J'ai toujours su que la perte de biodiversité, la déforestation en zone tropicale, le dépérissement des forêts dans l'hémisphère nord et le changement climatique étaient interdépendants et augmentaient de façon exponentielle, mais ce n'est que cette année que je crois avoir véritablement pris conscience de la vitesse à laquelle ces menaces se précisent.

– Thomas E. Lovejoy, 1988

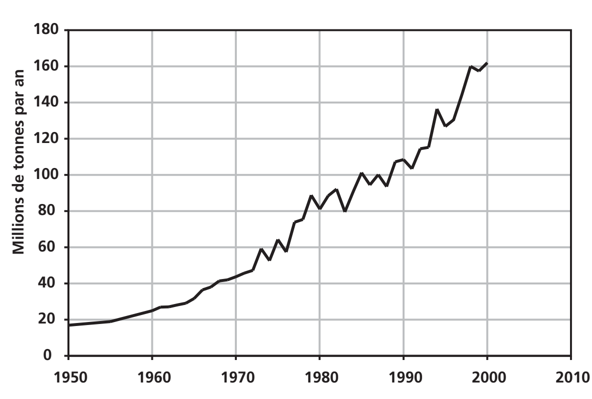
La cause première du dépassement est l'augmentation, l'accélération, le changement rapide. Depuis plus d'un siècle, de nombreuses caractéristiques physiques de notre système mondial augmentent rapidement. Ainsi, la population, la production de nourriture et la production industrielle, la consommation de ressources et la pollution augmentent toutes et souvent de plus en plus vite. Cet accroissement suit un schéma que les mathématiciens appellent *croissance exponentielle*.

Ce schéma est extrêmement répandu. Les figures 2-1 et 2-2 en présentent deux illustrations très différentes à travers les tonnages de soja produits chaque année et le nombre d'individus vivant en zone urbaine dans les pays en développement. Mis à part des

épisodes météorologiques extrêmes, des fluctuations économiques, des évolutions techniques, des épidémies ou des troubles qui provoquent quelques hauts et quelques bas dans la courbe, la croissance exponentielle est dans son ensemble une particularité dominante du système socioéconomique humain depuis la révolution industrielle.

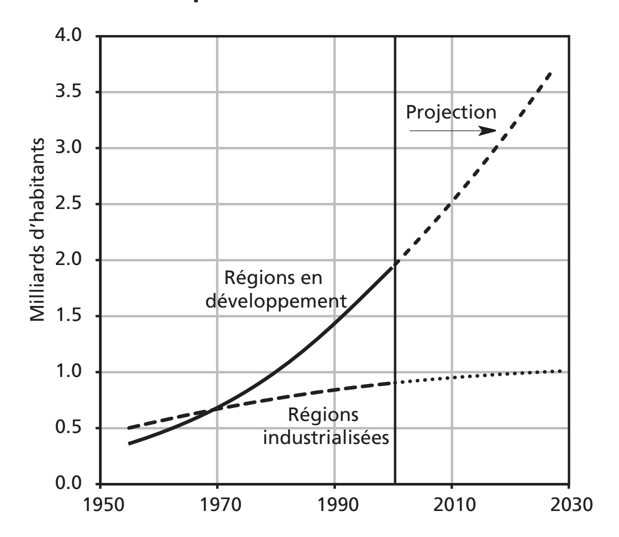
Ce type de croissance présente des caractéristiques inattendues qui le rendent très difficile à appréhender. C'est pourquoi nous allons décrire la croissance exponentielle, détailler ses causes et examiner les facteurs qui président à sa trajectoire, avant d'analyser les solutions à long terme. La croissance physique sur une planète finie s'arrête inévitablement à un certain moment. Mais quand ? Quelles sont les forces qui causeront son déclin ? Dans quel état laissera-t-elle l'humanité et l'écosystème mondial quand elle aura cessé ? Pour répondre à ces questions, il faut avant tout comprendre la structure du système qui pousse la population humaine et l'économie à tendre perpétuellement vers la croissance. Ce système est au centre du modèle World3 et, selon nous, il participe à la définition de la société mondiale.

FIGURE 2-1 – Production mondiale de soja



La production mondiale de soja augmente depuis 1950 et double tous les 16 ans. **(Sources : Worldwatch Institute ; FAO)**

FIGURE 2-2 – Population urbaine mondiale



Durant la seconde moitié du XXe siècle, la population urbaine a augmenté de façon exponentielle dans les régions les moins industrialisées de la planète, mais de façon quasi linéaire dans les régions les plus industrialisées. La population urbaine des pays en développement double en moyenne tous les 19 ans. Cette tendance devrait se poursuivre sur plusieurs décennies. **(Source : Nations Unies)**

La croissance exponentielle sous l'angle mathématique

Prenez un grand morceau de tissu et pliez-le en deux. Il devient donc deux fois plus épais. Pliez-le à nouveau pour qu'il soit quatre fois plus épais. Recommencez. Encore. Il est à présent 16 fois plus épais qu'au départ et fait 1 cm d'épaisseur.

Si vous pouviez continuer à le plier comme cela encore 29 fois pour arriver à un total de 33 pliages, quelle épaisseur pensez-vous qu'il ferait ? Moins de 30 cm ? Entre 30 cm et 3 m ? Entre 3 m et 1,5 km ?

Il est bien sûr impossible de plier 33 fois un morceau de tissu, mais si c'était possible, cela voudrait dire que l'épaisseur du tissu

équivaudrait à la distance séparant Boston de Francfort, soit 5 400 km[1] !

L'augmentation exponentielle, c'est-à-dire le fait de doubler à chaque fois, est un phénomène étonnant, car il donne très rapidement des chiffres extrêmement élevés. Cela nous surprend, car la plupart d'entre nous appréhendent la croissance comme un processus linéaire. Une certaine quantité augmente de façon *linéaire* quand *cette augmentation est constante sur une période donnée*. Si une équipe chargée de la construction d'une autoroute en construit un kilomètre par semaine, l'autoroute avance de façon linéaire. Si un enfant met chaque année 7 dollars dans sa tirelire, ses économies augmenteront elles aussi de façon linéaire. La quantité d'asphalte ajoutée est indépendante de la longueur d'autoroute déjà construite, de même que la quantité d'argent ajoutée chaque année est indépendante du montant de l'argent déjà présent dans la tirelire. Lorsqu'un facteur croît de façon linéaire, *son augmentation est toujours la même sur une période donnée* et ne dépend pas de la quantité déjà accumulée.

Une quantité croît de façon *exponentielle* quand *son augmentation est proportionnelle à la quantité déjà présent*e. Une colonie de cellules de levure dans laquelle chaque cellule se divise en deux toutes les 10 minutes croît de façon exponentielle : chaque cellule, au bout de 10 minutes, en donne deux. Dix minutes plus tard, il y en a 4, 10 minutes plus tard, 8, puis 16 et ainsi de suite. Plus il y a de cellules de levure, plus il en naît de nouvelles par unité de temps. Une entreprise dont le chiffre d'affaires brut augmente d'un certain pourcentage chaque année se développe de façon exponentielle. *Lorsqu'un facteur croît de façon exponentielle, son augmentation s'élève au fil du temp*s et dépend de la quantité de ce facteur déjà accumulée.

On peut illustrer l'énorme différence qu'il y a entre une augmentation linéaire et une augmentation exponentielle en prenant

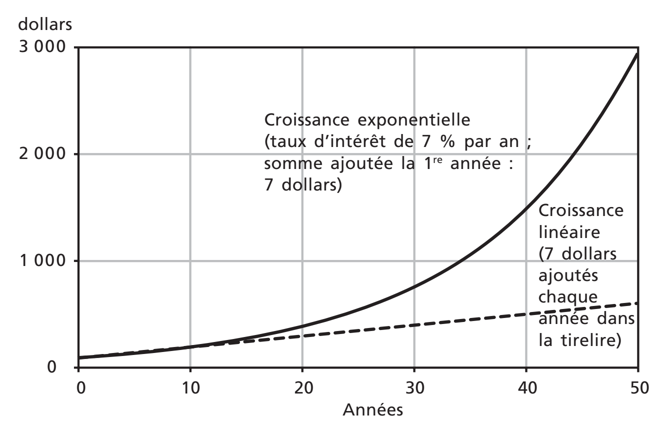
1. Cet exercice est décrit par Linda Booth-Sweeney et Dennis L. Meadows dans *The Systems Thinking Playbook,* vol. 3, Durham, NH, University of New Hampshire, 2001.

deux façons différentes d'augmenter une somme de départ de 100 dollars : on peut soit déposer cet argent sur un compte bancaire pour accumuler les intérêts, soit le mettre dans une boîte et y ajouter une somme fixe chaque année. Si l'on dépose 100 dollars sur un compte rémunéré à 7 % d'intérêts par an et qu'on laisse les intérêts s'accumuler, la somme investie va augmenter de façon exponentielle. Chaque année, il y aura un apport d'argent par rapport à la somme présente sur le compte. Le taux de cet apport est constant avec 7 % par an, mais la somme ajoutée augmente en valeur absolue. Cet ajout sera de 7 % à la fin de la première année ; l'année suivante, il sera à nouveau de 7 % mais par rapport à 107 dollars, ce qui fait 7,49 dollars et porte le total à 114,49 dollars au début de la troisième année. Cette année-là, les intérêts s'élèveront à 8,01 dollars, soit un total de 122,50 dollars. Au terme de la dixième année, le compte affichera la somme de 196,72 dollars.

Si vous mettez 100 dollars dans une boîte et que vous ajoutez 7 dollars tous les ans, la somme va augmenter de façon linéaire. Au terme de la première année, votre boîte, tout comme le compte bancaire, contiendra 107 dollars. Au bout de 10 ans, elle en contiendra 170, soit moins que le compte bancaire, mais pas démesurément moins.

Au départ, les deux stratégies d'épargne semblent donner des résultats assez similaires, mais l'effet explosif d'une augmentation exponentielle sur la durée finit par être évident (figure 2-3). Au bout de 20 ans, la boîte contient 240 dollars, tandis que le compte bancaire en détient près de 400. Au terme de la 30e année, l'augmentation linéaire de l'argent dans la boîte aura produit 310 dollars d'économies. Le compte bancaire, lui, avec ses 7 % d'intérêts annuels, dépassera les 761 dollars. Ainsi, en 30 ans, l'augmentation exponentielle à 7 % par an aura produit plus du double de l'augmentation linéaire, alors que dans les deux cas, la somme de départ était la même. À la fin de la 50e année, la somme sur le compte bancaire sera 6,5 fois plus élevée que celle de la boîte, soit une différence d'environ 2 500 dollars !

FIGURE 2-3 – Croissance linéaire contre croissance exponentielle de l'épargne



Si on met 100 dollars dans une tirelire et qu'on y ajoute chaque année 7 dollars, la somme épargnée va augmenter de façon linéaire, comme le montre la courbe en pointillés. Alors que si on dépose 100 dollars dans une banque à 7% de taux d'intérêts par an, la somme de départ va croître de façon exponentielle, doublant tous les 10 ans environ.

Les conséquences inattendues de la croissance exponentielle fascinent l'être humain depuis des siècles. Une légende perse raconte ainsi l'histoire d'un habile courtisan qui avait offert un magnifique échiquier à son roi et avait demandé en échange que ce dernier lui donne un grain de riz pour la 1re case, deux grains de riz pour la 2e, quatre grains pour la 3e, et ainsi de suite.

Le roi accepta et demanda qu'on aille chercher du riz dans ses entrepôts. La 4e case de l'échiquier nécessita 8 grains de riz, la 10e, 512 grains de riz, la 15e, 16 384, et la 21e rapporta au courtisan plus d'un million de grains de riz. Arrivé à la 41e case, il fallut faire venir mille milliards de grains de riz (10^{12}). Il ne fut pas possible de continuer jusqu'à la 64e, car il aurait fallu plus de riz qu'il n'y en avait dans le monde entier !

On a coutume en France de poser une énigme qui illustre un autre aspect de la croissance exponentielle : l'apparente soudaineté

avec laquelle une quantité qui croît de façon exponentielle atteint une limite donnée. Supposons que vous possédez un étang. Un jour, vous vous apercevez qu'au milieu de cet étang pousse un nénuphar. Vous savez que chaque jour, la taille du nénuphar va doubler. Vous prenez alors conscience que si vous laissez pousser la plante en toute liberté, elle aura complètement recouvert la surface au bout de 30 jours, étouffant toute autre forme de vie dans l'étang. Mais le nénuphar qui pousse est si petit que vous décidez de ne pas vous inquiéter. Vous vous en occuperez quand le nénuphar recouvrira la moitié de l'étang. En prenant cette décision, combien de temps vous êtes-vous donné pour empêcher la destruction des autres formes de vie dans votre étang ?

Eh bien, vous ne vous êtes laissé qu'un jour ! Le 29ᵉ jour, l'étang est à moitié recouvert. Donc le lendemain, après un dernier doublement de la taille du nénuphar, l'étang le sera entièrement. Au départ, attendre le moment où l'étang serait à moitié recouvert pour agir paraissait raisonnable. Le 21ᵉ jour, le nénuphar ne recouvre en effet que 0,2 % de l'étang. Le 25ᵉ jour, il en recouvre 3 % seulement. Et pourtant, la décision que vous avez prise ne vous a laissé qu'un jour pour sauver votre étang[2].

On voit bien ici comment une croissance exponentielle, à laquelle s'ajoute le temps de réaction, peut conduire au dépassement des limites. Pendant une longue période, l'augmentation paraît insignifiante et il ne semble pas y avoir de problème. Puis, la situation se met à changer de plus en plus vite jusqu'à ce que, avec le ou les deux derniers doublements, on n'ait plus le temps de réagir. Et le problème, désormais évident, causé par le nénuphar le dernier jour ne vient pas d'un quelconque changement du processus ; le rythme de croissance du nénuphar est resté exactement le même tout au long du mois. Il n'empêche : cette croissance exponentielle s'accumule soudainement et engendre un problème qui n'est plus gérable.

---

2. Nous sommes redevables de cette énigme au mathématicien Robert Lattès.

Vous pouvez directement faire l'expérience du passage soudain de l'insignifiance à la surcharge. Imaginons que vous décidiez de manger une cacahuète le 1er du mois, 2 cacahuètes le lendemain, 4 le jour suivant, et ainsi de suite. Au départ, vous achèteriez et vous consommeriez une quantité négligeable de nourriture. Mais bien avant la fin du mois, votre compte en banque et votre santé s'en ressentiraient sérieusement. Combien de temps pourriez-vous tenir avec cette ingestion exponentielle de nourriture qui double tous les jours ? Le 10e jour, vous n'auriez à consommer qu'un peu moins de 500 grammes de cacahuètes. Mais le dernier jour du mois, votre régime reposant sur un doublement journalier de votre consommation vous obligerait à acheter et à manger plus de 500 tonnes de cacahuètes !

Cette expérience ne vous serait pas très préjudiciable dans la mesure où, un jour, confronté à une quantité de cacahuètes impossible à ingurgiter, vous décideriez d'abandonner. Dans cet exemple, le délai n'est pas important entre le moment où vous entamez une action et celui où vous prenez pleinement conscience de ses conséquences.

Une quantité qui croît selon une fonction purement exponentielle double en un laps de temps constant. Dans le cas de la colonie de cellules de levure, le temps de doublement était de 10 minutes. Une somme d'argent placée dans une banque et rémunérée à 7 % par an double tous les 10 ans environ. Enfin, pour le nénuphar et l'expérience avec les cacahuètes, le temps de doublement était dans les deux cas d'une journée très précisément. Il y a un rapport très simple entre le taux d'accroissement en pourcentage et le temps qu'il faut pour qu'une quantité double : le temps de doublement est approximativement égal à 72 divisé par le taux d'accroissement en pourcentage[3]. Ce rapport est illustré par le tableau 2-1.

3. Cette approximation ne donne de valeurs de temps de doublement significatives que lorsque le taux d'accroissement est fréquemment appliqué. Ainsi, un taux d'accroissement de 100 % par jour donne un temps de doublement

TABLEAU 2-1 : Temps de doublement

Taux d'accroissement (% par an)	Temps de doublement approximatif (années)
0,1	720
0,5	144
1,0	72
2,0	36
3,0	24
4.0	18
5,0	14
6,0	12
7,0	10
10,0	7

On peut prendre l'exemple du Nigeria pour illustrer les conséquences du doublement continu. Ce pays comptait environ 36 millions d'habitants en 1950. En 2000, sa population était passée à environ 125 millions d'individus. Durant la seconde moitié du xxe siècle, elle a donc été multipliée par 4 ou presque. En 2000, son taux d'accroissement était de 2,5 % par an[4] ; le temps de doublement correspondant était donc d'environ 72 divisés par 2,5, soit à peu près 29 ans. Si le taux d'accroissement de la population continue à ce rythme dans les années à venir, la population nigériane connaîtra l'augmentation indiquée dans le tableau 2-2.

TABLEAU 2-2 : Accroissement de la population du Nigeria (extrapolation)

Année	Population (millions d'habitants)
2000	125
2029	250
2058	500
2087	1 000

d'environ 0,72 jour (ou 17 heures) si la quantité est augmentée de 4,17 % par heure. Mais si cette augmentation n'intervient qu'une fois par jour, comme dans l'exemple des cacahuètes cité ci-dessus, le temps de doublement est d'un jour.

4. Banque mondiale, *The Little Data Book 2001*, Washington, DC, Banque mondiale, 2001.

Un enfant nigérian né en 2000 est venu grossir une population 4 fois plus importante qu'elle ne l'était en 1950. Si l'accroissement démographique du pays reste constant après l'an 2000 et que cet enfant vit 87 ans, il aura assisté à la *multiplication par 8* de la population de son pays. À la fin du XXI[e] siècle, il y aura ainsi 8 fois plus de Nigérians qu'en 2000 et 28 fois plus qu'en 1950. Et le pays comptera plus d'un milliard d'habitants !

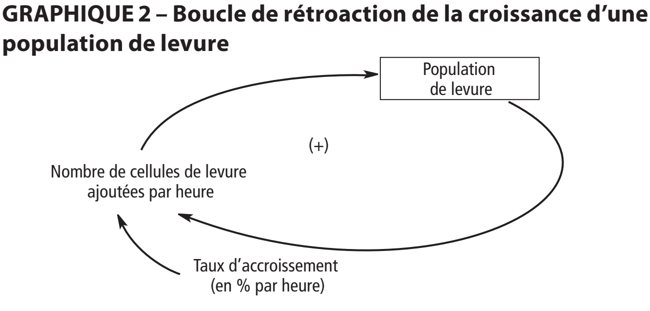
Le Nigeria fait d'ores et déjà partie des nombreux pays qui subissent la faim et la détérioration de leur environnement. Il est donc évident que sa population ne peut pas être multipliée par 8. La raison d'être du calcul effectué dans le tableau 2-2 est de montrer le caractère mathématique du temps de doublement et de faire la démonstration *qu'une croissance exponentielle ne peut jamais continuer très longtemps dans un contexte d'espace et de ressources finis*. Pourquoi, dès lors, ce type de croissance se poursuit-il actuellement dans le monde ? Et comment le stopper ?

Ce qui augmente de façon exponentielle

La croissance exponentielle peut prendre deux aspects. Si une entité est autoreproductible, sa croissance exponentielle est inhérente. Si, en revanche, elle est entraînée par autre chose qui croît de façon exponentielle, sa croissance est dérivée.

Tous les êtres vivants, des bactéries aux êtres humains, appartiennent à la première catégorie. Les êtres sont en effet produits par d'autres êtres. Nous pouvons illustrer la structure d'une population autoreproductible par le schéma suivant :

GRAPHIQUE 2 – Boucle de rétroaction de la croissance d'une population de levure



Le schéma ci-dessus nous est fourni par la discipline qui est la nôtre, la dynamique des systèmes, et il est assez précis. Le cadre autour de « population de levure » signifie qu'il s'agit d'un *stock*, c'est-à-dire une accumulation, un résultat net de tous les processus passés qui ont fait augmenter ou baisser la quantité de levure. Les flèches indiquent la causalité ou l'influence, qui peuvent s'exercer de nombreuses manières différentes. Sur ce schéma, la flèche du haut représente l'influence des flux physiques ; elle signifie que de nouvelles cellules de levure affluent et viennent grossir le stock, autrement dit la population de levure. La flèche du milieu représente l'influence de l'information ; cela signifie que la taille du stock a des répercussions sur la production de levure. Plus le stock est important, plus il peut y avoir production de nouvelles cellules, à la condition que rien ne vienne modifier le taux d'accroissement. (Certains facteurs le modifient, bien sûr, mais ils ont été exclus ici pour simplifier le schéma ; nous y reviendrons ultérieurement.)

Le signe (+) au centre de la boucle signifie que les deux flèches forment *une boucle de rétroaction positive* ou *boucle de renforcement*. Une boucle de rétroaction positive est une chaîne de relations de cause à effet qui boucle sur elle-même et entraîne un changement qui « s'autorenforce ». Son fonctionnement fait que la modification d'un élément à un endroit de la boucle aura des conséquences qui se répercuteront sur toute la chaîne des liens causaux pour finalement changer l'élément d'origine dans le même sens, mais avec encore plus d'intensité. Une augmentation entraînera ainsi une augmentation plus importante encore, et une diminution provoquera une diminution là aussi plus grande qu'auparavant.

Dans la dynamique des systèmes, le terme de *boucle positive* ne signifie pas obligatoirement que la boucle donne des résultats souhaitables. Cela fait simplement référence au fait que l'influence causale *se renforce* au sein de la boucle. De même, les boucles de rétroaction négatives, dont nous parlerons un peu plus loin, ne produisent pas nécessairement de mauvais résultats. En

fait, elles ont souvent un effet stabilisant. Elles sont négatives au sens où elles *contrebalancent, inversent ou équilibrent* l'influence causale le long de la boucle.

Une boucle de rétroaction positive peut donner un « cercle vertueux » ou un « cercle vicieux » selon que l'augmentation qu'elle entraîne est souhaitée ou non. Elle permet la croissance exponentielle de la levure dans le pain qui lève ou celle de votre argent sur votre compte bancaire rémunéré. Il s'agit donc là de résultats souhaitables. Mais une boucle positive peut aussi être responsable de l'apparition de nuisibles dans une culture ou du développement du virus du rhume dans votre gorge, ce qui n'est pas souhaitable.

Dès que le stock d'un système est pris dans une boucle de rétroaction positive, il a le *potentiel* pour croître de façon exponentielle. Cela ne veut pas dire qu'il *va* croître de façon exponentielle, mais qu'il en a la *capacité* s'il est libéré de toute contrainte. La croissance peut être entravée par de nombreux facteurs tels qu'un manque d'éléments nutritifs (dans le cas de la levure), une température peu élevée et la présence d'autres populations (dans le cas des nuisibles) et, en ce qui concerne la population humaine, d'incitations, de facteurs décourageants, d'objectifs, de catastrophes, de maladies ou encore d'aspirations. Le taux de croissance varie avec le temps et diffère selon les endroits. Mais en l'absence de contrainte, la levure, les nuisibles et la population se développent tous trois de façon exponentielle.

Le stock de *capital industriel* peut lui aussi présenter une croissance exponentielle inhérente. En effet, machines et usines peuvent ensemble fabriquer d'autres machines et d'autres usines. Une aciérie peut produire de l'acier destiné à une autre aciérie ; une usine d'écrous et de boulons peut fabriquer des écrous et des boulons qui tiennent ensemble les pièces de machines qui fabriquent elles-mêmes des écrous et des boulons ; n'importe quelle entreprise qui fait des profits génère de l'argent qui peut lui servir à investir et ainsi à se développer. Le capital physique comme le capital monétaire rendent possible l'accumulation d'une quantité encore plus grande de capital dans cette économie industrielle

qui est la nôtre, qui s'autoalimente et qui est tournée vers la croissance.

Ce n'est pas un hasard si le monde industriel, aujourd'hui, attend de son économie qu'elle connaisse chaque année un certain pourcentage de croissance, en l'occurrence 3 %. Nous attendons cela parce que pendant des siècles le capital a toujours généré plus de capital encore. Il est devenu habituel d'épargner et d'investir pour l'avenir, de mettre de côté une certaine fraction de la richesse totale dans l'espoir qu'elle sera investie et générera une richesse encore plus importante à l'avenir. Une économie croît de façon exponentielle dès lors que l'autoreproduction du capital n'est pas entravée par des facteurs tels que la demande, la disponibilité de main-d'œuvre, les matières premières, l'énergie, les fonds d'investissement ou quoi que ce soit susceptible de freiner la croissance d'un système industriel complexe. À l'instar de la population, le capital est doté d'une *structure propre* (une boucle de rétroaction positive) qui lui permet de produire un *fonctionnement* de croissance exponentielle. Bien entendu, les économies ne se développent pas toujours, pas plus que les populations. Mais elles sont structurées pour cela et quand elles se développent, elles le font de façon exponentielle.

Il existe nombre d'autres facteurs dans nos sociétés qui peuvent croître de manière exponentielle. La violence peut ainsi être exponentielle en soi et la corruption semble être un phénomène qui s'autoalimente. Le changement climatique fonctionne lui aussi à partir d'un certain nombre de rétroactions positives. Les émissions de gaz à effet de serre, par exemple, font grimper la température dans l'atmosphère, ce qui accélère la fonte du pergélisol des régions arctiques. Lorsqu'il fond, le pergélisol libère du méthane, un puissant gaz à effet de serre qui peut faire grimper bien plus encore les températures du globe. Certaines rétroactions positives sont explicitement incluses dans World3. Nous avons ainsi modélisé les forces qui influencent la fertilité des sols. Et un certain nombre de technologies semblent connaître une croissance exponentielle ; nous en ferons l'expérience dans le

chapitre 7. Mais nous restons convaincus que les processus de croissance de la population et de l'industrie constituent les principales forces qui entraînent la société mondiale au-delà des limites, et c'est sur ces processus que nous allons mettre l'accent.

La population et le capital productif sont les moteurs de la croissance exponentielle que connaît la société humaine. D'autres éléments, comme la production de nourriture, l'utilisation des ressources et la pollution ont tendance à croître de façon exponentielle, non pas parce qu'ils se multiplient eux-mêmes, mais parce que leur croissance est *entraînée* par celle de la population et du capital. Il n'y a pas d'autogénération, de boucle de rétroaction positive entraînant la reproduction des pesticides présents dans les nappes phréatiques, ni celle du charbon dans le sol. Les conséquences physiques et biologiques de la culture de 6 tonnes de blé à l'hectare ne rendent pas plus simple la culture de 12 tonnes de cette céréale sur la même surface. À un certain moment, lorsque les limites sont atteintes, chaque doublement de la quantité de plantes cultivées ou de minéraux extraits ne devient pas plus facile, mais au contraire plus compliqué que le doublement précédent.

Donc, admettons que la production de nourriture et l'utilisation de matériaux et d'énergie aient augmenté de façon exponentielle (ce qui est le cas) : leur croissance ne vient pas de leurs capacités structurelles propres, mais de la population et de l'économie qui, s'étant développées de façon exponentielle, ont réclamé davantage de nourriture, de matières et d'énergie et sont parvenues à en produire davantage. De même, la pollution et les déchets n'ont pas augmenté à cause de leur propre structure de rétroaction positive, mais à cause de l'augmentation des quantités de matières transportées et d'énergie utilisée par l'économie humaine.

Une hypothèse centrale du modèle World3 est que la population et le capital sont structurellement capables de croissance exponentielle. Ce n'est pas une hypothèse arbitraire, elle est étayée par les caractéristiques visibles du système socioéconomique mondial et par les schémas historiques en matière de changement. La croissance de la population et celle du capital entraînent une

accentuation de l'empreinte écologique des humains, sauf si nous modifions profondément nos préférences en matière de consommation et que nous utilisons beaucoup plus efficacement nos ressources. Aucun de ces deux changements ne s'est encore produit. La population humaine et l'ensemble des usines, ainsi que les flux d'énergie et de matière qui leur sont nécessaires ont augmenté de façon exponentielle depuis au moins un siècle, mais pas de façon régulière ni simple, et non sans subir les forts impacts d'autres boucles de rétroaction. Le monde est plus compliqué que cela. Et World3 aussi, comme nous allons le voir.

La croissance de la population mondiale

En 1650, la planète comptait environ un demi-milliard d'habitants. La population augmentait alors de 0,3 % par an et doublait tous les 240 ans ou presque.

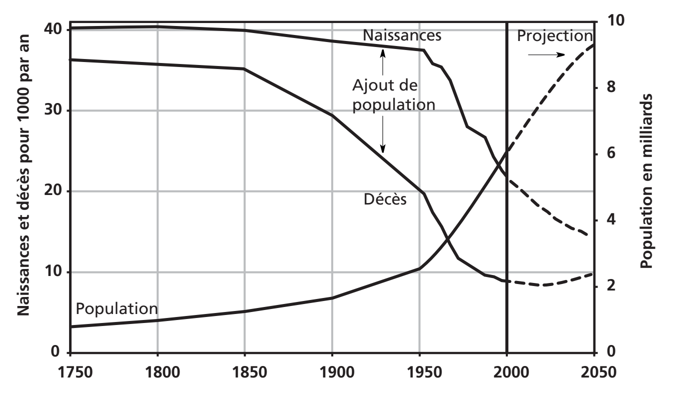
En 1900, la population mondiale avait atteint 1,6 milliard d'habitants et progressait de 0,7 à 0,8 % par an, doublant tous les 100 ans environ.

En 1965, la planète totalisait 3,3 milliards d'habitants. Le taux d'accroissement avait atteint 2 % par an, d'où un temps de doublement d'environ 36 ans. Ainsi, la population ne s'est pas contentée d'augmenter de façon exponentielle depuis 1650, mais elle l'a fait de façon « *super*exponentielle », car le taux de croissance lui-même a augmenté. Et il a augmenté pour une raison qui a de quoi nous réjouir : la baisse de la mortalité. La natalité elle aussi a baissé, mais plus lentement. Voilà pourquoi la population a explosé.

Après 1965, la mortalité a continué à baisser, mais la natalité a chuté encore plus vite en moyenne (figure 2-4). Et tandis que la population passait de 3,3 milliards à un tout petit peu plus de 6 milliards en l'an 2000, le *taux* d'accroissement tombait de 2 à 1,2 % par an[5].

5. Population Reference Bureau, *1998 World Population Data Sheet*, Washington, DC, 2008.

FIGURE 2-4 – Transition démographique mondiale



L'écart entre les naissances et les décès détermine le rythme auquel la population croît. Jusqu'en 1965 environ, le taux de mortalité moyen a baissé plus vite que le taux de natalité, si bien que le taux d'accroissement de la population a augmenté. Depuis 1965, le taux de natalité moyen baisse plus vite que le taux de mortalité. Le rythme auquel la population croît a donc considérablement ralenti, ce qui n'empêche pas la croissance de continuer à être exponentielle. **(Source : Nations Unies)**

Ce revirement de situation constitue un véritable bouleversement, et est dû à un changement profond des facteurs culturels qui influencent les choix des individus au sujet de la taille de leur famille, et des facteurs techniques qui leur permettent de concrétiser leurs choix. Le nombre moyen d'enfants par femme dans le monde est passé de 5 dans les années 1950 à 2,7 dans les années 1990. En Europe, au début du XXIe siècle, la famille moyenne comptait 1,4 enfant par couple, soit beaucoup moins que nécessaire pour le renouvellement des générations[6]. On prévoit que la population européenne va lentement décliner, ce qui devrait la faire passer de 728 millions d'habitants en 1998 à 715 millions en 2025[7].

6. Division de la population des Nations Unies, *1998 Revision : World Population Estimates and Projections*, New York, Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, 1998.

7. Population Reference Bureau, *op. cit.*

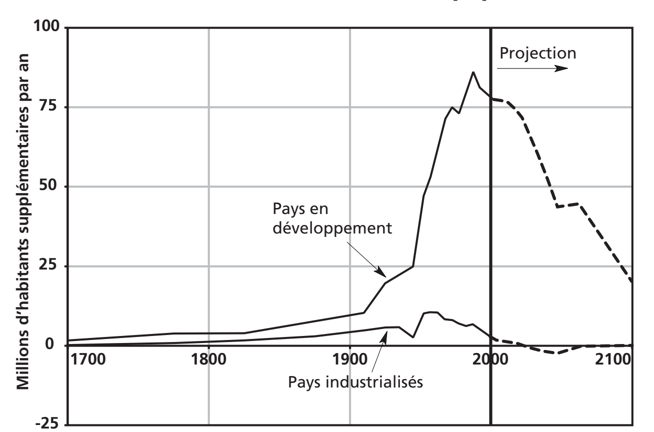
La baisse de la fécondité ne signifie pas que la croissance de la population mondiale a cessé ni qu'elle n'est plus exponentielle. Elle signifie simplement que le temps de doublement s'est allongé (il est passé de 36 ans à 2 % par an à 60 ans à 1,2 % par an) et pourrait s'allonger encore. Le nombre net d'individus supplémentaires sur la planète était en fait plus élevé en 2000 qu'il ne l'était en 1965, malgré un taux d'accroissement plus faible. Le tableau 2-3 nous explique pourquoi : le taux de l'année 2000, moins élevé, était multiplié par un nombre d'habitants plus important.

Le nombre de personnes supplémentaires par an sur la planète n'a pas augmenté depuis la fin des années 1980. Mais l'ajout de 75 millions d'individus en 2000 équivalait néanmoins à plus de neuf fois la population de la ville de New York. Ou, pour être plus juste, étant donné que l'accroissement démographique a presque entièrement été le fait de pays en développement, cela correspondait, en un an, à la population totale des Philippines ou bien à dix Pékin ou six Calcutta. Et même si l'on fait preuve d'optimisme quant à la baisse à venir du taux de natalité, nous devons néanmoins prévoir que la population va continuer à augmenter fortement, particulièrement dans les pays les moins développés (figure 2-5).

TABLEAU 2-3 – Ajouts à la population mondiale
(Source : Nations Unies)

Année	Population (millions)	X	Taux d'accroissement (% par an)	=	Ajout de population (millions par an)
1965	3 300	X	2,03	=	68
1970	3 690	X	1,93	=	71
1975	4 070	X	1,71	=	70
1980	4 430	X	1,70	=	75
1985	4 820	X	1,71	=	82
1990	5 250	X	1,49	=	78
1995	5 660	X	1,35	=	76
2000	6 060	X	1,23	=	73

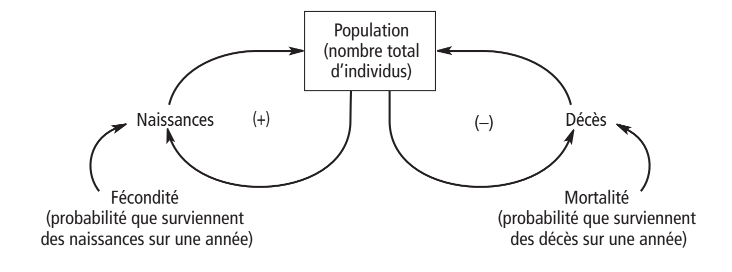
FIGURE 2-5 – Accroissement annuel de la population mondiale



Jusqu'à récemment, le nombre d'individus supplémentaires que comptait la planète augmentait. D'après les projections des Nations Unies, l'ajout annuel de population va bientôt chuter fortement. Ces projections partent de l'hypothèse d'une rapide baisse du taux de natalité dans les pays en développement. **(Sources : Nations Unies ; D. Bogue)**

La structure en boucle de rétroaction qui préside à notre système démographique est présentée ci-dessous.

GRAPHIQUE 3 – Boucle de rétroaction des naissances et boucle de rétroaction des décès



À gauche figure la boucle positive qui peut engendrer une croissance exponentielle. Plus la population est importante, plus

il y a de naissances par an. À droite, on peut voir la *boucle de rétroaction négative*. Tandis que les boucles positives génèrent une croissance galopante, les boucles négatives tendent à réguler cette croissance, à maintenir le système dans des limites acceptables ou à le ramener à un état stable dans lequel les stocks gardent une valeur plus ou moins constante sur la durée. Une boucle de rétroaction négative propage les conséquences d'un changement sur un élément tout le long du cercle jusqu'à ce que ces conséquences en aient fait le tour et modifient l'élément dans le sens *opposé* au changement de départ.

Le nombre de décès par an est égal à la population totale multipliée par la mortalité moyenne, c'est-à-dire la probabilité moyenne qu'un décès survienne. Le nombre de naissances est lui égal à la population totale multipliée par la fécondité moyenne. Et le taux d'accroissement d'une population est égal à sa fécondité moins sa mortalité. Bien sûr, ni la fécondité ni la mortalité ne sont des phénomènes constants. Ils sont tributaires de facteurs économiques, environnementaux et démographiques tels que les revenus, l'éducation, les soins de santé, les technologies de planification familiale, la religion, les niveaux de pollution et la structure par âge de la population.

La théorie la plus répandue pour expliquer *comment* la fécondité et la mortalité évoluent et *pourquoi* le taux d'accroissement de la population mondiale chute est intégrée au modèle World3 et a pour nom la *transition démographique*. Selon cette théorie, dans les sociétés préindustrielles, la fécondité et la mortalité sont toutes deux élevées et l'accroissement démographique est lent. À mesure que l'alimentation et les services de santé s'améliorent, le taux de mortalité baisse. Les taux de fécondité restent inchangés pendant une génération ou deux, créant un écart entre la fécondité et la mortalité qui entraîne une rapide augmentation de la population. Enfin, les individus et les modes de vie évoluant vers un modèle de société entièrement industrialisée, le taux de natalité baisse à son tour et l'accroissement naturel ralentit.

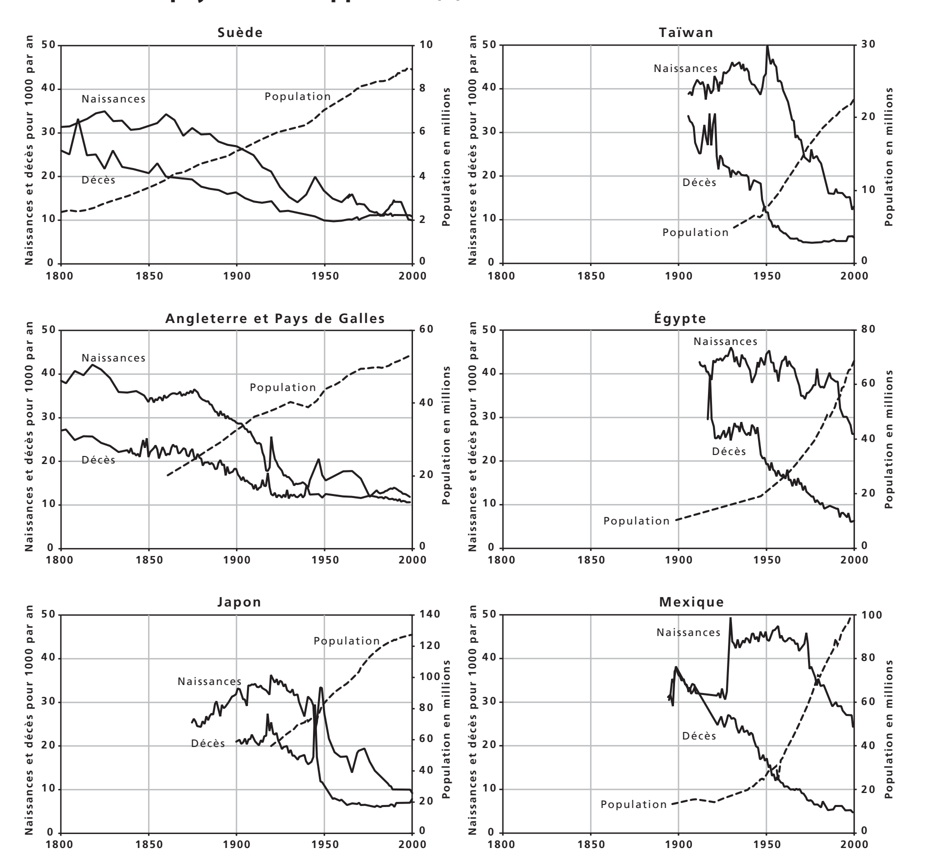
Les évolutions démographiques de six pays sont présentées figure 2-6. On peut constater que les taux de natalité et de mortalité de pays qui sont industrialisés depuis longtemps, comme la Suède, ont baissé très lentement. L'écart entre ces deux taux n'a jamais été très important et la population n'a jamais augmenté de plus de 2 % par an. Sur l'ensemble de la période de transition démographique, la population de la plupart des pays de l'hémisphère Nord n'a pas connu un taux d'accroissement de plus de 5 %. En l'an 2000, seul un petit nombre de pays industrialisés connaissaient un taux de fécondité supérieur au seuil de renouvellement des générations, ce qui explique que la plupart d'entre eux vont devoir faire face à une baisse de leur population dans les années à venir. Certains pays continuaient d'enregistrer un accroissement démographique, dû à l'immigration, à un élan démographique (le nombre de personnes jeunes atteignant l'âge de procréation était supérieur au nombre de personnes âgées dépassant cet âge), ou aux deux.

Au Sud, où les taux de mortalité ont baissé plus tard et plus vite, un écart important s'est formé entre les naissances et les décès. Cette partie du monde a connu des taux d'accroissement naturels bien plus élevés qu'aucun pays du Nord (mis à par l'Amérique du Nord, qui a absorbé d'importantes vagues d'immigration venues d'Europe). De nombreux pays du Sud ont déjà connu des taux d'accroissement de 10 % et leur population continue à augmenter. Ils sont donc loin d'avoir achevé leur transition démographique.

Les démographes *ne s'accordent pas sur les raisons du lien* entre transition démographique et industrialisation. Les facteurs décisifs ne se limitent pas à la seule augmentation des revenus. La figure 2-7 montre ainsi la corrélation entre le revenu par habitant (représenté par le revenu national brut, ou RNB[8], par personne et

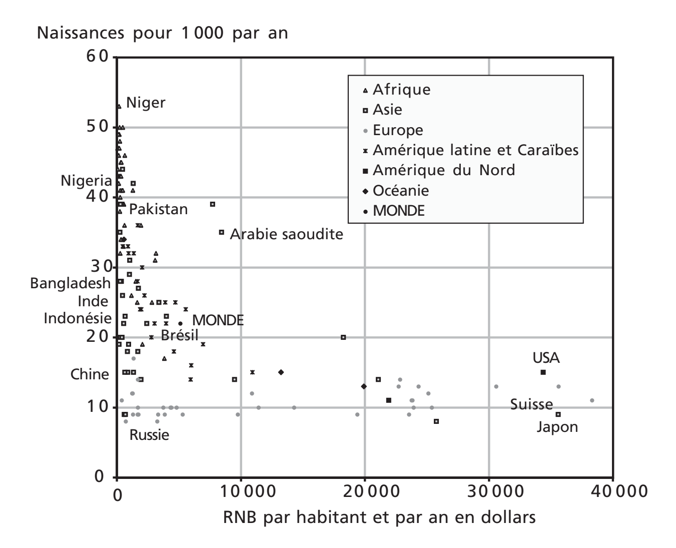
8. Le revenu national brut (RNB) est égal au produit intérieur brut (PIB) auquel s'ajoutent les revenus du pays avec le reste du monde. Le PIB mesure la valeur de la production des biens et des services à l'intérieur des frontières d'un pays.

FIGURE 2-6 – Transition démographique de pays industrialisés (A) et de pays en développement (B)



Lors de la transition démographique, le taux de mortalité d'un pays baisse en premier, suivi par le taux de natalité. La transition démographique en Suède s'est déroulée sur près de 200 ans, le taux de natalité restant toujours relativement proche du taux de mortalité. Durant cette période, la population suédoise a été multipliée par moins de 5. Le Japon offre l'exemple d'un pays qui a effectué sa transition en moins d'un siècle. Les pays en développement à la fin du XXe siècle ont connu des écarts entre leurs taux de natalité et de mortalité bien plus importants que ceux qu'ont connus les pays aujourd'hui industrialisés. **(Sources : N. Keyfitz et W. Flieger ; J. Chesnais ; Nations Unies ; PRB ; UK ONS ; République populaire de Chine)**

FIGURE 2-7 – Taux de natalité et revenu national brut par habitant en 2001



Plus une société s'enrichit, plus son taux de natalité a tendance à baisser. Les pays les plus pauvres connaissent des taux de natalité compris entre 20 et plus de 50 naissances pour 1000 habitants par an. Aucun des pays les plus riches n'enregistre en revanche un taux de natalité supérieur à 20 pour 1000 par an. **(Sources : PRB ; Banque mondiale)**

par an) et les taux de natalité de différents pays dans le monde. Il y a de toute évidence un lien très fort entre des revenus élevés et des taux de natalité faibles. Mais il est tout aussi patent que, surtout en ce qui concerne les bas revenus, on note des exceptions frappantes : la Chine, par exemple, présente un taux de natalité anormalement bas compte tenu de son niveau de revenus. Et dans certains pays du Moyen-Orient et d'Afrique, ce taux est au contraire anormalement élevé.

Le facteur considéré comme le plus *directement* lié à la baisse du taux de natalité n'est pas tant l'essor ou la richesse de l'économie, mais la répercussion réelle du développement économique sur la vie de toutes les familles et plus particulièrement sur celle

des femmes. Le RNB par habitant n'arrive ainsi qu'après des facteurs tels que l'éducation et l'emploi (surtout pour les femmes), la planification familiale, la faible mortalité infantile et une distribution relativement égalitaire des revenus et des opportunités[9]. La Chine, le Sri Lanka, le Costa Rica, Singapour, la Thaïlande, la Malaisie et plusieurs autres pays ont apporté la preuve que lorsque l'alphabétisation, les soins de santé fondamentaux et la planification familiale sont mis à la disposition de la majorité des familles, les taux de natalité peuvent chuter même si les revenus restent modestes.

Le modèle World3 contient de nombreux facteurs qui influencent le taux de natalité. Nous partons ainsi de l'hypothèse qu'une économie plus riche fournit une alimentation et des soins de meilleure qualité, ce qui fait baisser le taux de mortalité, et qu'elle améliore également la planification familiale et réduit la mortalité infantile, d'où, par là même, le taux de natalité. Nous supposons également que l'industrialisation, sur le long terme et au bout d'un certain temps, fait baisser la taille désirée des familles, car elle augmente le coût de l'éducation des enfants et réduit l'avantage économique immédiat que ces derniers représentent pour les parents. Nous supposons enfin qu'une augmentation à court terme des revenus donne aux familles les moyens financiers d'avoir davantage d'enfants, tout en restant dans les limites de la taille de famille à laquelle elles aspirent, et qu'une stagnation à court terme de ces mêmes revenus produit l'effet inverse[10].

En d'autres termes, le modèle suppose et, le plus souvent, génère une transition démographique à long terme, modulée par de petites réactions à court terme face à une augmentation ou à

9. Voir, par exemple, Partha S. Dasgupta, « Population, Poverty and the Local Environment », *Scientific American*, février 1995 ; Bryant Robery, Shea O. Rutstein et Leo Morris, « The Fertility Decline in Developing Countries », *Scientific American*, décembre 1993 ; et Griffith Feeney, « Fertility Decline in East Asia », *Science*, vol. 244, nº 5190, 2 décembre 1994.

10. Pour plus de détails, voir Donella H. Meadows, « Population Sector », *in* Dennis L. Meadows *et al.*, *Dynamics of Growth in a Finite World*, *op. cit.*

une baisse des revenus. La tendance de la population à la croissance exponentielle est dans un premier temps encouragée, puis elle est modérée par les pressions, les opportunités, les technologies et les normes de la révolution industrielle.

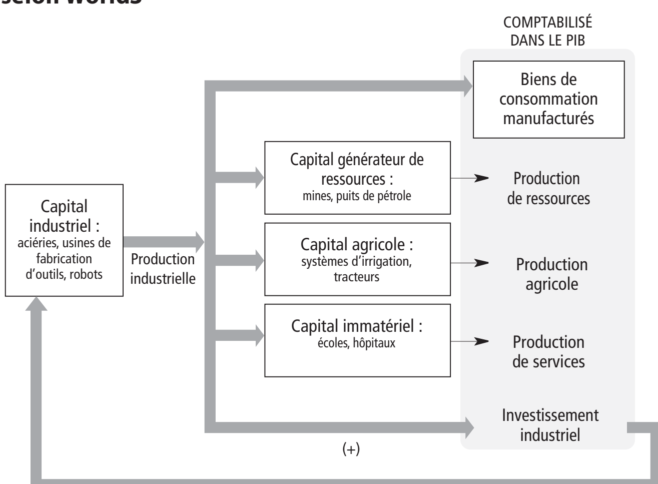
Dans ce « monde réel » qui est le nôtre en ce début de millénaire, la population continue à croître de façon exponentielle, même si son taux de croissance est en baisse. Les raisons de cette baisse ne se limitent pas au revenu par habitant. La croissance économique n'est pas synonyme d'amélioration du bien-être, d'une plus grande liberté de choix pour les femmes ni de taux de natalité plus faibles, mais elle contribue à coup sûr à ce que ces objectifs soient atteints. Mis à part quelques exceptions de taille, on trouve bien les taux de natalité les plus bas du monde dans les pays les plus riches. Il est donc d'autant plus important de comprendre les causes et les conséquences de la croissance économique dans le monde, et dans le modèle World3.

La croissance industrielle mondiale

Les débats publics sur l'économie sont très confus, en grande partie parce qu'on fait mal la distinction entre l'argent et les choses tangibles qu'il représente[11]. C'est une distinction que nous devons clairement établir ici. La figure 2-8 montre la façon dont nous représentons l'économie dans World3, la façon dont nous allons en parler tout au long de cet ouvrage et la façon dont, selon

11. On peut illustrer cette confusion à travers une histoire que nous a racontée le grand géologue, M. King Hubbert, au début des années 1970. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les Britanniques, sachant que le Japon était sur le point d'envahir la péninsule malaise, grosse productrice de caoutchouc pour l'ensemble de la planète, se lancèrent dans une vaste opération pour déplacer le plus de caoutchouc possible dans une réserve située en Inde. Ils arrivèrent tout juste, alors que les Japonais envahissaient la Malaisie, à stocker ce qu'ils pensaient être une quantité suffisante de caoutchouc pour pouvoir fabriquer des pneus et d'autres produits dont ils allaient avoir besoin jusqu'à la fin de la guerre. Mais une nuit, la réserve de caoutchouc prit feu et fut entièrement dévastée. « Ce n'est pas grave », répondirent certains économistes britanniques en apprenant la nouvelle. « Nous étions assurés ».

FIGURE 2-8 – Flux de capital physique dans l'économie selon World3



La génération et la répartition de la production industrielle sont au centre de l'économie simulée par World3. La quantité de capital industriel détermine l'ampleur de la production industrielle annuelle. Cette production est répartie entre cinq secteurs en fonction des objectifs et des besoins de la population. Une partie du capital industriel est consommée ; une autre est attribuée au secteur des ressources pour assurer l'approvisionnement en matières premières ; une autre encore part dans l'agriculture pour développer les terres cultivées et augmenter les rendements ; une quatrième est investie dans les services sociaux et le reste est consacré à l'industrie pour compenser la dépréciation du capital et continuer à accroître le stock de capital industriel.

nous, il est pertinent de l'envisager à une époque où les limites naturelles sont atteintes. Nous mettons l'accent sur *l'économie physique*, c'est-à-dire sur les éléments concrets qui se heurtent aux limites de notre planète, et non sur *l'économie monétaire* qui est une invention sociale indépendante des lois physiques.

Le *capital industriel* renvoie ici à tout ce qui est matériel, c'est-à-dire aux machines et aux usines qui produisent les biens manufacturés. (Avec la contribution, bien entendu, du travail, de

l'énergie, des matériaux, de la terre, de l'eau, de la technologie, de la finance, de l'administration et des services fournis par la planète à travers ses écosystèmes naturels et ses flux biogéochimiques. Mais nous reviendrons à ces cofacteurs de production dans le prochain chapitre.) Nous appelons *production industrielle* le flot de produits tangibles (biens de consommation et biens d'équipement) fabriqués par le capital industriel.

Une partie de la production industrielle prend la forme d'équipements ou de bâtiments tels que des hôpitaux, des écoles, des banques ou des magasins. Nous appelons cela le *capital immatériel*. Il engendre son propre flot de production, qui est donc immatérielle, mais possède une valeur bien réelle puisqu'il s'agit par exemple des soins de santé ou de l'éducation.

Un autre type de production industrielle est représenté par le capital agricole – tracteurs, entrepôts, systèmes d'irrigation, moissonneuses – qui engendre une *production agricole* constituée essentiellement de produits alimentaires et de fibres.

La production industrielle peut aussi prendre la forme de foreuses, de puits de pétrole, d'équipements miniers, de pipelines, de pompes, de camions-citernes, de raffineries et de hauts fourneaux. Tout cela constitue du *capital générateur de ressources*, c'est-à-dire qu'il produit le flot de matières premières et d'énergie indispensable au fonctionnement des autres formes de capitaux.

Une partie de la production industrielle entre dans la catégorie des *biens de consommation* : vêtements, voitures, radios, réfrigérateurs, maisons. La quantité de biens de consommation par habitant est un indicateur important du bien-être matériel de la population.

Enfin, une partie de la production prend la forme de *capital industriel*. C'est ce que nous appelons *l'investissement* – aciéries, générateurs électriques, tours à métaux et autres machines – qui compense la dépréciation du capital et peut contribuer à augmenter le stock de capital industriel et, par là même, la production à venir.

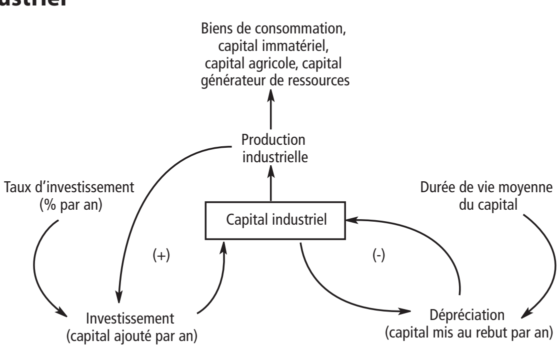
Tout ce que nous avons mentionné jusqu'ici est constitué d'éléments physiques, il n'est pas question d'argent. Le rôle de

l'argent dans le « monde réel » est de véhiculer de l'information sur les valeurs et les coûts relatifs des choses (valeurs assignées par les producteurs et les consommateurs qui ont un certain pouvoir sur le marché). L'argent sert de médiateur et d'incitateur aux flux de capitaux physiques et de produits. La valeur monétaire annuelle de l'ensemble de la production physique de biens et de services, présentée à la figure 2-8, est définie comme le PIB, le produit intérieur brut.

Nous y ferons référence à travers de nombreux tableaux et figures, car les données économiques mondiales sont principalement exprimées en termes monétaires et non physiques. Mais ce qui nous intéresse, c'est ce que le PIB *représente :* les véritables stocks de capitaux, les biens industriels, les services, les ressources, les produits agricoles et les biens de consommation. C'est cela, et non les dollars, qui permet à l'économie et à la société de fonctionner. Contrairement aux dollars, tout cela est extrait de la planète et finit par lui être rendu sous forme de déchets dans le sol, l'air ou l'eau.

Nous avons déjà souligné que le capital industriel peut croître de façon exponentielle grâce à son caractère autoreproductible. La structure en boucle de rétroaction qui illustre cette « autogénération » est semblable à celle que nous avons présentée concernant notre système démographique.

GRAPHIQUE 4 – Structure en boucle de rétroaction du capital industriel



Une quantité donnée de capital industriel (usines, camions, ordinateurs, centrales électriques) engendre une certaine quantité de produits manufacturés chaque année à partir du moment où les autres intrants nécessaires sont suffisants. Un certain pourcentage de la production annuelle est consacré aux investissements – métiers à tisser, moteurs, bandes de transport, acier, ciment –, ce qui permet d'augmenter le stock de capital et donc d'accroître la capacité de production à venir. C'est ce que l'on peut appeler le « taux de natalité » du capital. La fraction investie, à l'instar de la fécondité humaine, n'est pas toujours la même, et dépend des décisions prises, des souhaits et des contraintes. On constate certains délais dans cette boucle de rétroaction positive puisque la planification, le financement et le temps de construction d'équipements aussi importants que des voies ferrées, des centrales électriques ou des raffineries se comptent en années, voire en décennies.

Le capital, comme la population, présente une « boucle de décès » et une « boucle de naissance ». Au fur et à mesure que les machines et les usines s'usent ou deviennent obsolètes, elles sont fermées, démantelées, recyclées ou jetées. Le taux de dépréciation du capital est analogue au taux de mortalité en démographie. Plus il y a de capital, plus il y a de dépréciation chaque année, donc moins il reste de capital pour l'année suivante, à moins que l'afflux de nouveaux investissements soit suffisant pour remplacer le capital déprécié.

De la même façon que les populations subissent une transition démographique au cours du processus d'industrialisation, les stocks de capitaux d'une économie empruntent une trajectoire bien connue jalonnée de développements et de changements. Les économies préindustrielles sont avant tout agricoles et immatérielles. Lorsque la boucle de croissance du capital se met en marche, tous les secteurs économiques se développent, mais dans un premier temps, c'est le secteur industriel qui connaît l'essor le plus rapide. Ensuite, une fois la base industrielle établie, la croissance touche avant tout le secteur tertiaire (voir figure 2-9).

Cette transition est inscrite dans le modèle World3 comme mode de croissance économique par défaut en attendant que des modifications délibérées soient apportées et que d'autres possibilités puissent être testées[12].

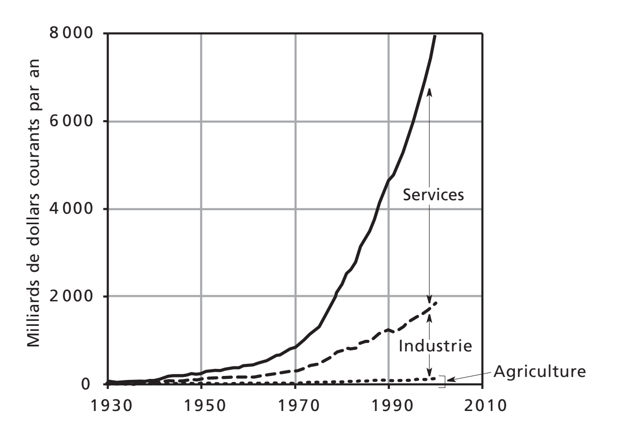
On qualifie parfois les économies les plus développées d'économies tertiaires, mais elles continuent néanmoins à avoir besoin d'une solide structure agricole et industrielle. Hôpitaux, écoles, banques, magasins, restaurants et hôtels font tous partie du service tertiaire. Mais il suffit d'observer les camions de livraison qui viennent les approvisionner en nourriture, papier, carburant et équipements et les camions de la voirie qui collectent leurs déchets, ou bien de mesurer ce qui s'évacue par leurs canalisations ou leurs cheminées pour être convaincu que les entreprises du secteur tertiaire ont recours à un flux physique constant et volumineux qui part des sources de notre planète pour finir dans ses exutoires. Elles jouent donc un rôle important, tout comme les industries, dans l'empreinte écologique de l'humanité.

Il se peut que les aciéries et les mines soient éloignées géographiquement des bureaux qui participent à l'économie de l'information. Il arrive également que la quantité de matériaux utilisés augmente moins vite que la valeur en dollars de la production. Mais comme le montre la figure 2-9, même dans une économie « postindustrielle », les fondements industriels résistent bel et bien. L'information est un produit merveilleux, précieux et désincarné, mais elle est stockée dans des ordinateurs de bureau qui, à partir de 1997, étaient chacun fabriqués avec 28 kg de plastique, de métal, de verre et de silicium, nécessitaient pour fonctionner une puissance de 150 watts et avaient produit au cours de leur fabrication 70 kg de déchets[13]. Et les individus qui produisent, traitent et utilisent l'information ne font pas que consommer des

12. Voir William W. Behrens III, Dennis L. Meadows et Peter M. Milling, « Capital Sector », *in Dynamics of Growth in a Finite World, op. cit.*.

13. John C. Ryan et Alan Thein Durning, *Stuff : The Secret Lives of Everyday Things*, Seattle, Northwest Environment Watch, 1997.

FIGURE 2-9 – Revenu national brut par secteur aux États-Unis



Cet historique de la répartition de la valeur de la production économique américaine entre services, industrie et agriculture montre une transition vers une économie tertiaire. Il faut noter cependant que, même si les services se taillent la part du lion de l'économie, les secteurs industriel et agricole continuent à se développer en valeur absolue. **(Source : U.S. Bureau of Economic Analysis)**

aliments, ils conduisent aussi des voitures, vivent dans des maisons, travaillent dans des bâtiments climatisés ou chauffés et, même à l'âge de la communication électronique, utilisent et jettent quantité de papier.

Sous l'influence de la boucle positive qui engendre de la croissance au sein du système capitaliste mondial, l'industrie s'est développée plus vite que la population. Entre 1930 et 2000, la valeur monétaire de la production industrielle a été multipliée par 14 (comme le montre la figure 1-2). Si la population était restée à un niveau constant durant cette période, le niveau de vie matériel aurait lui aussi été multiplié par 14, mais du fait de l'accroissement démographique, la production moyenne par habitant a été multipliée par 5. Entre 1975 et 2000, la taille de l'économie industrielle a peu ou prou doublé, tandis que la production par habitant n'augmentait que de 30 %.

Plus d'habitants, plus de pauvreté, plus d'habitants

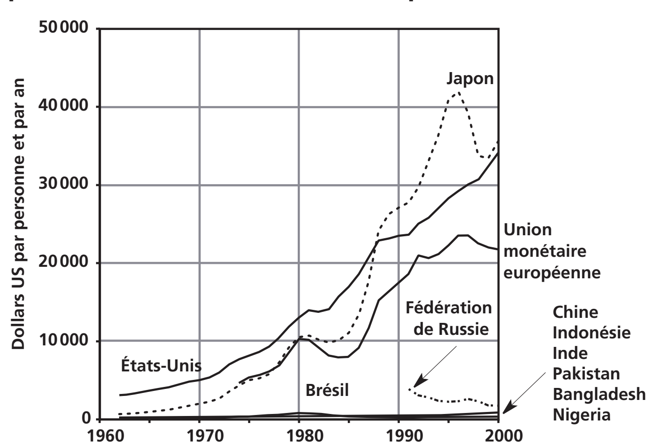
La croissance est nécessaire pour mettre un terme à la pauvreté. Cela paraît évident. Ce qui paraît en revanche moins évident à ses nombreux partisans, c'est que la croissance dans le système économique tel qu'il est structuré aujourd'hui ne mettra pas un terme à la pauvreté. Au contraire, les modes de croissance actuels perpétuent la pauvreté et accentuent le fossé entre les riches et les pauvres. En 1998, plus de 45 % des habitants de la planète devaient vivre avec en moyenne 2 dollars par jour, voire moins. Cela signifie qu'il y avait davantage de pauvres en 1998 qu'en 1990, à l'issue d'une décennie durant laquelle beaucoup s'étaient pourtant étonnamment enrichis[14]. La multiplication par 14 de la production industrielle mondiale depuis 1930 a permis à certains de devenir extrêmement riches, mais elle n'a pas tordu le cou à la pauvreté. Et il n'y a aucune raison de penser qu'une nouvelle multiplication par 14 (si elle était possible au sein des limites de notre planète) mettrait un terme à la pauvreté, à moins que le système mondial dans son ensemble ne subisse une restructuration pour que la croissance bénéficie à ceux qui en ont vraiment besoin.

Avec le système économique qui est le nôtre actuellement, il y a généralement croissance dans les pays qui sont déjà riches et elle se répercute de façon disproportionnée sur les individus les plus riches de ces mêmes pays. Sur la figure 2-10, on peut voir la courbe de progression du RNB par habitant dans les 10 pays les plus peuplés du monde ainsi que dans l'Union européenne. On constate à quel point des décennies de croissance ont systématiquement creusé l'écart entre les pays riches et les pays pauvres.

Selon le Programme des Nations Unies pour le développement, en 1960, les 20 % d'habitants vivant dans les pays les plus riches touchaient 30 fois le revenu par personne des 20 % vivant dans les pays les plus pauvres. En 1995, le ratio moyen des revenus entre les 20 % les plus riches et les 20 % les plus pauvres était passé

14. Banque mondiale, *World Development Indicators – 2001*, Washington, DC, Banque mondiale, 2001.

FIGURE 2-10 – RNB par habitant des 10 pays les plus peuplés de la planète et de l'Union monétaire européenne

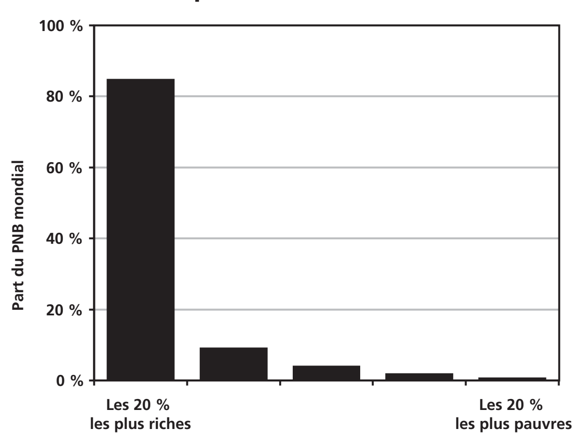


La croissance économique se produit avant tout dans les pays déjà riches. L'Indonésie, la Chine, le Pakistan, l'Inde, le Bangladesh et le Nigeria abritent à eux six près de la moitié de la population mondiale. Leur RNB par habitant décolle à peine de l'axe des abscisses lorsqu'on le fait figurer aux côtés du RNB par habitant de pays plus riches. **(Source : Banque mondiale)**

de 30 pour un à 82 pour un. Au Brésil, la moitié la plus pauvre de la population recevait 18 % du revenu national en 1960, mais seulement 12 % en 1995. Les 10 % de Brésiliens les plus riches touchaient 54 % du revenu national en 1960, un chiffre qui avait atteint les 63 % en 1995[15]. Un ménage africain moyen consommait 20 % de moins en 1997 qu'en 1972[16]. Un siècle de croissance économique a donc laissé un monde dans lequel les disparités entre riches et pauvres sont colossales. Deux indicateurs, présentés dans la figure 2-11, illustrent cet état de fait, la part du produit national brut et la part de la consommation d'énergie selon différentes catégories de revenus.

15. Programme des Nations Unies pour le développement, *Rapport mondial sur le développement humain 1998*, Paris, Economica, 1998.
16. *Ibid*.

FIGURE 2-11 – Disparités mondiales



La répartition mondiale de la richesse et des opportunités est extrêmement déséquilibrée. Les 20 % d'habitants les plus riches dans le monde contrôlent plus de 80 % du PNB mondial et consomment près de 60 % de l'énergie commerciale mondiale. **(Source : Banque mondiale)**

Lorsque nous autres, dynamiciens des systèmes, observons un schéma qui se répète à plusieurs endroits du système sur de longues périodes, nous estimons que les causes de ce schéma sont intrinsèques à la structure en boucle de rétroaction du système. Faire fonctionner ce dernier avec plus d'intensité ou de vitesse ne changera rien au schéma tant que la structure en elle-même ne sera pas modifiée. La croissance a été notre règle et elle a élargi le fossé entre les riches et les pauvres. Si nous continuons sur le même mode, ce fossé ne se refermera jamais. Il n'y a qu'en changeant la structure du système, c'est-à-dire les relations de cause à effet, que nous pourrons y parvenir.

Mais quelle est donc cette structure qui éloigne toujours plus les riches des pauvres alors même que la croissance économique est extrêmement élevée ? Il y a ici deux structures génériques à l'œuvre. La première est liée à certains fonctionnements sociétaux, parfois communs à de nombreuses sociétés, parfois propres à certaines d'entre elles seulement, q*ui récompensent toujours les*

privilégiés en leur attribuant pouvoir et ressources afin qu'ils acquièrent encore plus de privilèges. Les exemples vont de la discrimination ethnique plus ou moins avouée aux niches fiscales pour les plus riches, d'une nutrition de moins bonne qualité pour les enfants de parents démunis aux écoles triées sur le volet pour les enfants de familles aisées, de l'utilisation de l'argent en politique, et ce, même dans les prétendues démocraties, au simple fait que les paiements avec intérêts sortent des poches de ceux qui n'ont pas assez d'argent pour aller dans celles des personnes qui en ont plus que nécessaire.

En matière de systèmes, ces structures sont appelées boucles de rétroaction « on ne prête qu'aux riches »[17]. Ce sont des boucles positives qui récompensent ceux qui réussissent en leur donnant les moyens de continuer à le faire. Ces boucles ont tendance à être endémiques dans les sociétés qui ne mettent pas consciemment en place les structures compensatoires permettant à tous de jouer dans la même cour. (Ces structures peuvent par exemple prendre la forme de lois antidiscrimination, de taux d'imposition progressifs, de mesures pour rendre l'instruction et les soins de santé accessibles à tous, de « filets de sécurité » pour venir en aide à ceux qui traversent des périodes difficiles, d'impôts sur le capital et de processus démocratiques permettant de préserver la politique de l'influence de l'argent.)

Aucune de ces boucles « on ne prête qu'aux riches » n'est explicitement représentée dans le modèle World3, car ce dernier ne traduit pas la dynamique des revenus, de la richesse ou de la répartition du pouvoir. Il se concentre sur la relation dans son ensemble entre l'économie mondiale et les limites à la croissance[18]. Il part donc du principe d'une continuation des schémas de répartition actuels.

---

17. Voir, par exemple, Peter Senge, *La cinquième discipline*, Paris, First éditions, 1992.

18. Nous modelons de façon implicite des boucles « on ne prête qu'aux riches » en prenant pour hypothèse les schémas de répartition actuels dans le monde, à moins que nous n'intervenions pour les changer.

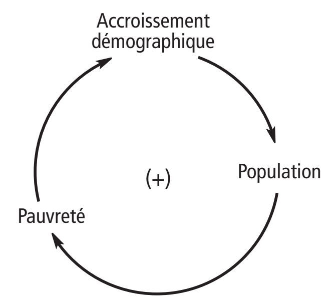
Il existe cependant une structure dans World3 qui traduit le lien entre la population et les différents systèmes de capitaux tels que nous les avons décrits dans ce chapitre. Cette structure entretient la pauvreté, la croissance démographique et la tendance du système mondial à dépasser ses limites. Une telle structure doit être changée, comme nous le démontrerons plus loin dans cet ouvrage, si nous voulons créer un monde soutenable.

Cette structure qui entretient la pauvreté tient au fait qu'il est plus facile pour les populations riches d'économiser, d'investir et de faire fructifier leur capital que cela ne l'est pour les populations pauvres. Non seulement les riches peuvent davantage contrôler les conditions du marché, acheter de nouvelles technologies et disposer de ressources, mais des siècles de croissance ont bâti pour eux un vaste stock de capitaux qui se multiplient. La plupart des besoins fondamentaux sont satisfaits, on peut donc se permettre des taux d'investissement relativement élevés sans priver la population de l'essentiel. Un faible accroissement démographique permet d'allouer une plus grande partie de la richesse à la croissance économique et une moindre partie à la satisfaction des besoins en matière de santé et d'éducation qu'afficherait une population de plus en plus nombreuse.

Dans les pays pauvres, en revanche, la croissance du capital a du mal à suivre le rythme de l'accroissement démographique. La richesse qui pourrait être réinvestie sert de préférence à construire des écoles et des hôpitaux et à pourvoir aux besoins fondamentaux en matière de consommation. Et, la satisfaction de ces besoins immédiats laissant peu de place à l'investissement industriel, l'économie se développe lentement. La transition démographique reste bloquée à la phase intermédiaire, celle où l'écart entre les naissances et les décès est important. Lorsque les femmes ne perçoivent pas d'alternative éducative ou économique séduisante au fait d'avoir des enfants, ces derniers restent une des seules formes d'investissement à leur disposition. Voilà pourquoi la population croît, mais sans s'enrichir. D'où l'expression : « Les riches font de l'argent et les pauvres font des enfants. »

L'importance à accorder aux flèches du schéma ci-dessous suscite parfois des débats enflammés dans les réunions internationales : est-ce la pauvreté qui entraîne l'accroissement démographique ou l'inverse ?

GRAPHIQUE 5 – Pauvreté et démographie



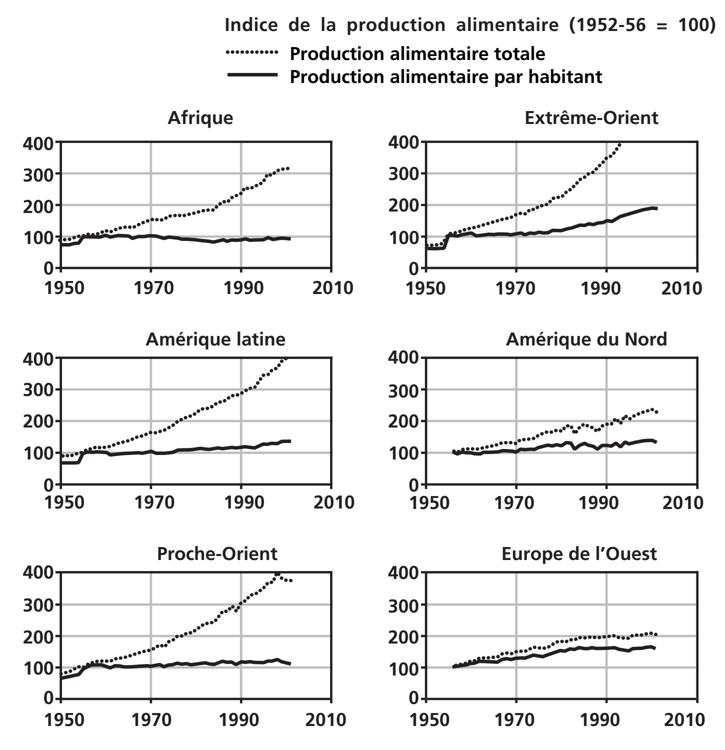
Dans les faits, chaque élément de cette boucle de rétroaction positive exerce une importante influence sur le comportement des populations dans les pays pauvres. Ensemble, ils forment un « système piège », une boucle « d'aggravation de situations déjà problématiques » : les pauvres restent pauvres et la population continue à augmenter. La richesse n'étant pas consacrée à l'investissement mais à la consommation, la croissance de la population ralentit celle du capital. La pauvreté perpétue de son côté cette croissance de la population, car les individus n'ont pas accès à l'éducation, aux soins de santé ou à la planification familiale et n'ont ni alternative ni pouvoir. Leur seul espoir est que leurs enfants leur apportent un revenu ou participent aux travaux de la famille.

La figure 2-12 illustre l'une des conséquences de ce piège. Dans tous les pays en développement, la production de nourriture a enregistré une forte augmentation ces 20 dernières années. Elle a doublé voire triplé pour la plupart d'entre eux. Mais du fait de l'accroissement démographique soutenu, la production de nourriture par personne ne s'est pour ainsi dire pas améliorée, et

en Afrique, elle a même régulièrement baissé. Les seules zones où la production de nourriture a véritablement devancé la croissance de la population sont l'Europe et l'Extrême-Orient.

Les graphiques de la figure 2-12 reflètent une double tragédie. La première est d'ordre humanitaire : la spectaculaire augmentation de la production de nourriture, signe d'une réussite agricole

FIGURE 2-12 – Production alimentaire par région



L'indice de la production alimentaire totale (indice égal à 100 en 1952-56) a doublé voire triplé ces 50 dernières années dans les régions du monde où la faim est la plus présente, mais l'indice de production alimentaire par habitant est resté quasiment inchangé dans ces mêmes régions, car la population a augmenté dans les mêmes proportions ou presque. En Afrique, la production alimentaire par habitant a baissé de 9 % entre 1996 et 2001. **(Source : FAO)**

certaine, s'est surtout traduite non par une alimentation plus adaptée de la population, mais par l'alimentation inadaptée d'un plus grand nombre de personnes. La seconde tragédie est d'ordre environnemental : l'augmentation de la production de nourriture a été obtenue au prix de politiques qui ont ravagé les sols, les ressources en eau, les forêts et les écosystèmes, ce qui rendra plus difficile toute augmentation future de la production.

Mais toute boucle de rétroaction positive nuisible à un système peut être inversée pour lui être favorable. Qui dit augmentation de la pauvreté dit augmentation de la population, donc, à nouveau, augmentation de la pauvreté. Mais, à l'inverse, la réduction de la pauvreté ralentit l'accroissement démographique, qui réduit à son tour la pauvreté. Donc si l'on parvient à soutenir l'investissement sur une période suffisamment longue, à attribuer un juste prix aux produits et une juste rémunération au travail, à allouer une plus grande part de la richesse directement aux pauvres et plus particulièrement à l'éducation, à l'emploi des femmes, ainsi qu'à la planification familiale, on peut inverser les effets de la boucle population-pauvreté. Les avancées sociales peuvent ralentir la croissance démographique, ce qui peut permettre d'investir davantage dans le capital industriel et de produire plus de biens et de services. Et la hausse de la consommation de biens et de services contribue à réduire davantage encore l'accroissement de la population.

Dans les régions du monde où l'on porte une attention particulière au bien-être de la population dans son ensemble et à celui des pauvres en particulier, ce revirement est en train de se produire. C'est ce qui explique, entre autres, que l'accroissement démographique mondial soit en baisse et que la transition démographique soit en marche.

Mais dans d'autres pays où l'inégalité est inscrite dans les mentalités, où il y a un manque de ressources ou de volonté pour investir dans le bien-être de la population, dans les pays où les problèmes monétaires ont conduit à la mise en place de programmes d'« ajustement structurel » qui détournent les investissements

de l'éducation et des soins de santé, il n'y a aucune amélioration généralisée du niveau de vie des habitants. Engluées dans la misère et augmentant toujours, ces populations courent le terrible risque de voir leur accroissement interrompu non par une natalité en baisse, mais par des taux de mortalité en hausse. Le Zimbabwe, le Botswana, la Namibie, la Zambie et le Swaziland devraient ainsi enregistrer une croissance démographique nulle au début du XXIe siècle pour une raison éminemment tragique : le décès des jeunes adultes et des enfants à cause du sida[19].

La croissance exponentielle de la population et de la production industrielle est inscrite dans la structure « autogénérative » du système socioéconomique du « monde réel ». Mais le processus est complexe et tend à faire pencher certaines parties du monde du côté d'un accroissement démographique lent et d'une croissance industrielle rapide et d'autres du côté d'une croissance industrielle lente et d'un accroissement démographique rapide. Mais dans un cas comme dans l'autre, la population et le capital physique continuent de croître.

Est-il réaliste d'estimer qu'une telle croissance physique peut se poursuivre indéfiniment ? Notre réponse est non ! La croissance de la population et du capital accroît l'empreinte écologique de l'humanité, c'est-à-dire le poids que les humains font peser sur les écosystèmes de la planète. Il faudrait, pour y remédier, que des démarches soient entreprises pour limiter l'accentuation de cette empreinte. Il est en principe possible de réduire l'empreinte écologique de chaque aspect de l'activité humaine (grâce à la technologie et à d'autres moyens) assez rapidement pour permettre une croissance continue de la population et du capital. Mais nous ne pensons pas que cela se traduira dans la pratique. Ce que nous observons dans le monde aujourd'hui nous montre combien la réduction de notre empreinte écologique est insuffisante. Cette

19. Lester R. Brown, Gary Gardner et Brian Halweil, « Beyond Malthus : Sixteen Dimensions of the Population Problem », *Worldwatch Paper*, nº 143, Washington, DC, Worldwatch Institute, septembre 1998.

dernière continue à augmenter (voir la figure P-1 dans la préface des auteurs), bien qu'à un rythme plus lent que l'économie.

Une fois que l'empreinte a dépassé un niveau soutenable, ce qui est déjà le cas, elle doit à terme diminuer, soit au moyen d'un processus délibéré (grâce, par exemple, à une rapide amélioration de l'éco-efficience), soit par l'action de la nature (à travers une baisse de la consommation de bois à mesure que les forêts disparaissent, par exemple). La question n'est donc pas de savoir si l'augmentation de l'empreinte écologique va s'arrêter, la question est de savoir quand et par quels moyens.

L'accroissement démographique va cesser soit parce que le taux de natalité va continuer à diminuer, soit parce que les décès vont se mettre à grimper, soit pour ces deux raisons. En ce qui concerne la croissance industrielle, elle va s'arrêter soit parce que le taux d'investissement va chuter, soit parce que la dépréciation du capital va se mettre à augmenter, soit pour ces deux raisons. Si nous anticipons ces tendances, nous pourrons peut-être exercer un contrôle rationnel sur elles, en choisissant la meilleure des solutions. En revanche, si nous n'en tenons pas compte, ce sont les systèmes naturels qui choisiront une issue pour nous, sans se soucier de notre bien-être.

Les taux de natalité, de mortalité, d'investissement et de dépréciation seront équilibrés par les choix des humains ou par les réactions des sources et des exutoires de la planète, trop sollicités. Les courbes de croissance exponentielle ralentiront alors, fléchiront et se stabiliseront, ou déclineront. À ce stade, les répercussions sur l'humain et sur la planète pourraient être catastrophiques.

Il est bien trop aisé de classer les phénomènes selon qu'ils sont « mauvais » ou « bons » et de s'en tenir à ces seules classifications. Des générations durant, les croissances démographique et industrielle ont été considérées comme résolument bonnes et il est vrai que sur une planète peu densément peuplée et offrant d'abondantes ressources, il n'y avait pas de raison de penser autrement. Aujourd'hui, en revanche, du fait de notre prise de conscience de

plus en plus aiguë des limites écologiques, il peut être tentant de considérer toute croissance comme négative.

La prise de décision à une époque où certaines limites sont atteintes exige plus de doigté et des classifications plus réfléchies. Certaines populations ont désespérément besoin de davantage de nourriture, d'un toit et de biens matériels. D'autres, touchées par une forme différente de désespoir, tentent d'utiliser la croissance matérielle pour satisfaire d'autres besoins, tout aussi réels mais immatériels : besoin d'être accepté, reconnu, d'appartenir à une communauté, besoin identitaire. Cela n'a donc pas de sens d'être dithyrambique au sujet de la croissance ou au contraire de la fustiger en bloc. Mieux vaut se poser les questions suivantes : *croissance de quoi ? Pour qui ? À quel prix ? Financée par qui ? De quel type de besoin parle-t-on vraiment et quel est le moyen le plus direct et le plus efficient de le satisfaire pour ceux qui ressentent ce besoin ? Comment déterminer ce qui est suffisant ? Quelles obligations avons-nous de partager ?*

Les réponses à ces questions nous ouvrent la voie d'une société autonome et équitable. Les réponses aux questions suivantes nous ouvriront, quant à elles, la voie d'une société durable : *aux besoins de combien d'individus peut-on pourvoir à partir d'un flux donné de ressources et en ne dépassant pas une certaine empreinte écologique ? Selon quel niveau de consommation matérielle ? Pendant combien de temps ? À quel point le système physique qui supporte la population humaine, l'économie et toutes les autres espèces est-il sollicité ? Quelle est la résilience de ce système et vis-à-vis de quels types et de quelles quantités de stress ? À partir de quand est-on dans l'excès ?*

Nous devons abandonner les causes de la croissance pour nous tourner vers les limites qui se posent à cette croissance. C'est l'objet du chapitre 3.

CHAPITRE 3

Les limites : sources et exutoires

Les technologies que nous avons adoptées et qui nous ont permis d'acquérir des ressources pour un coût en dollars constant voire en baisse nécessitaient souvent des quantités toujours plus importantes de combustible direct ou indirect […] *Ce luxe est aujourd'hui devenu une nécessité coûteuse qui implique qu'une part toujours plus grande du revenu national soit allouée aux secteurs de transformation des ressources pour en obtenir la même quantité.*

– Commission mondiale de l'environnement
et du développement, 1987

Si un éventuel effondrement nous inquiète, ce n'est pas parce que nous estimons que l'humanité est sur le point d'épuiser les stocks d'énergie et de matières premières de la planète. Tous les scénarios produits par World3 indiquent en effet qu'en 2100, la planète disposera encore d'une part importante des ressources qu'elle avait en 1900. Lorsque nous analysons les projections de World3, nous nous inquiétons davantage des coûts croissants de l'exploitation des sources et des exutoires de notre planète. Les données sur ces coûts ne sont pas toutes pertinentes et suscitent d'âpres débats, mais nous pouvons en conclure que l'exploitation croissante des ressources renouvelables, la disparition des matières non renouvelables et le remplissage des exutoires font

ensemble augmenter, lentement mais sûrement, la somme d'énergie et de capitaux requise pour continuer à assurer la quantité et la qualité des flux de matière qu'exige notre économie. Ces coûts résultent d'une association de facteurs physiques, environnementaux et sociaux. À terme, ils seront trop élevés pour que l'industrie puisse continuer à se développer. Lorsque nous en serons là, la boucle de rétroaction positive qui a rendu possible l'expansion de l'économie matérielle va faire machine arrière et l'économie va se contracter.

Nous ne sommes pas en mesure de prouver cette affirmation. Mais nous pouvons essayer de la rendre crédible, puis souligner les réponses constructives que nous pouvons y apporter. Pour ce faire, nous présentons dans ce chapitre un grand nombre d'informations sur les sources et les exutoires de la planète. Nous résumons la situation et les perspectives concernant toute une série de ressources qui seront nécessaires à la croissance économique et démographique mondiale lors du siècle à venir. Cette liste de ressources est longue et disparate, mais elle peut être divisée en deux grandes catégories.

La première regroupe les éléments physiques sur lesquels s'appuient toutes les activités biologiques et industrielles : terres fertiles, ressources minières, énergie, ainsi que les écosystèmes de la planète qui absorbent les déchets et régulent le climat. En théorie, ces éléments sont tangibles et dénombrables ; on parle ainsi d'hectares de terres arables et de forêts, de kilomètres cubes d'eau douce, de tonnes de métaux et de milliards de barils de pétrole. Mais dans la pratique, ils sont étonnamment difficiles à quantifier. On ne sait pas exactement quelle est leur quantité totale et ils interagissent de différentes manières : dans certains cas, une ressource peut se substituer à une autre, mais dans d'autres, le fait d'en produire une peut rendre plus difficile la production d'une autre ressource. Les définitions des termes « *ressources* », « *réserves* », « *consommation* » et « *production* » ne sont pas stables, la science présente des lacunes et les bureaucraties manipulent ou tiennent souvent les chiffres secrets à des fins

politiques et économiques. Les informations concernant des données physiques sont généralement exprimées à l'aide d'indices économiques comme leur prix. Ces derniers sont déterminés par les marchés et obéissent à un certain nombre de règles qui n'ont rien à voir avec celles qui gouvernent les ressources physiques. Nous allons néanmoins nous attarder sur ces éléments physiques dans ce chapitre.

La seconde catégorie d'éléments indispensables à la croissance est constituée des besoins sociaux. Même si les systèmes physiques de la planète peuvent supporter des pays à la fois bien plus peuplés et bien plus développés sur le plan industriel, la croissance de l'économie et de la population dépendra de facteurs tels que la paix et la stabilité sociale, l'égalité et la sécurité de chacun, la présence de dirigeants honnêtes et prévoyants, l'éducation et l'ouverture aux idées nouvelles, la capacité à admettre ses erreurs et à tenter de nouvelles expériences, ainsi que la base institutionnelle nécessaire à des avancées techniques régulières et pertinentes.

Ces facteurs sociaux sont difficiles à mesurer et toute prévision précise à leur sujet est sans doute impossible. Ni cet ouvrage ni World3 ne traitent explicitement de ces facteurs de façon détaillée et exploitable. Nous ne disposons pas des données ni des théories causales qui nous permettraient de les intégrer à notre analyse formelle. Mais nous savons que si une terre fertile, une énergie en quantité suffisante, des ressources appropriées et un environnement sain sont nécessaires à la croissance, ils n'y suffisent pas. Même s'ils sont présents en abondance, des problèmes sociaux peuvent les rendre inaccessibles. Nous partons cependant du principe, dans cet ouvrage, que les meilleures conditions sociales possibles prévaudront.

Les matières et l'énergie utilisées par la population et les usines ne viennent pas de nulle part. Elles sont extraites de la planète. Et elles ne disparaissent pas. Lorsque leur usage économique est terminé, les matières sont recyclées ou bien constituent des déchets et des polluants, et la chaleur inexploitable de l'énergie se

dissipe. Les flux de matière et d'énergie proviennent des *sources* de la planète, passent par le *sous-système économique* et finissent dans les *exutoires* de cette même planète sous forme de déchets et de polluants (figure 3-1). Le recyclage et des modes de production plus propres peuvent considérablement réduire les déchets et la pollution par unité de consommation, sans pour autant les éliminer totalement. Les humains auront toujours besoin de nourriture, d'eau, d'air sain, d'un toit et de bien d'autres éléments pour se développer, rester en bonne santé, mener des vies productives et générer à la fois des capitaux et une descendance. Quant aux machines et aux bâtiments, ils auront toujours recours à l'énergie, à l'eau, à l'air, à certains types de métaux, de produits chimiques et de matières biologiques pour pouvoir produire des biens et des services, être réparés et construire d'autres machines

FIGURE 3-1 – Population et capital dans l'écosystème planétaire

La population et le capital puisent dans des flux de combustibles et de ressources non renouvelables issus de la planète et produisent des flux de sortie de chaleur et de déchets qui contaminent l'air, l'eau et les sols.
(Sources : R. Goodland, H. Daly et S. El Serafy)

et d'autres bâtiments. Or il y a des limites au rythme auquel les sources peuvent produire ce dont nous avons besoin, et les exutoires absorber ces flux sans porter préjudice aux humains, à l'économie ni aux processus de régénération et de régulation de la planète.

La nature de ces limites est complexe, car sources et exutoires font eux-mêmes partie d'un système dynamique et intégré, régi par les cycles biogéochimiques de la planète. On constate des limites à court terme (la quantité de pétrole raffiné stockée dans les réservoirs, par exemple) et des limites à long terme (la quantité de pétrole accessible sous terre). Il peut y avoir interaction entre les sources et les exutoires, et un système naturel peut à la fois servir de source et d'exutoire. Une parcelle de terre peut ainsi représenter une source de cultures vivrières et un exutoire pour les pluies acides causées par la pollution de l'air. Et sa capacité à assurer l'une des deux fonctions peut dépendre de la mesure dans laquelle elle doit assurer l'autre.

L'économiste Herman Daly propose trois règles simples pour définir les limites soutenables aux flux de matière et d'énergie[1] :

Concernant les *ressources renouvelables* – le sol, l'eau, la forêt, les poissons – leur utilisation durable ne doit pas dépasser le rythme auquel ces ressources se régénèrent. (Ainsi, par exemple, la pêche est dite non durable lorsque les stocks de poissons sont pêchés plus vite que le rythme auquel la population restante se reproduit.)

Concernant les *ressources non renouvelables* – combustibles fossiles, minerais de forte teneur, eaux souterraines fossiles – leur utilisation durable ne doit pas dépasser le rythme auquel une ressource renouvelable, utilisée de façon soutenable, peut les remplacer. (Exemple : un gisement de pétrole sera utilisé de façon

1. Herman Daly, « Toward Some Operational Principles of Sustainable Development », *Ecological Economics*, vol. 2, nº 1, avril 1990. Voir un autre développement dans l'introduction à Herman Daly, *Beyond Growth*, Boston, Beacon Press, 1996.

durable si une partie des profits qu'il permet de dégager est systématiquement investie dans des éoliennes, des panneaux photovoltaïques ou dans la plantation d'arbres pour que, une fois le pétrole épuisé, un flux équivalent d'énergie renouvelable soit disponible.)

Concernant les *polluants*, le taux d'émission soutenable ne doit pas dépasser le rythme auquel ces polluants peuvent être recyclés, absorbés ou rendus inoffensifs dans l'exutoire. (Exemple : les eaux usées peuvent être déversées dans un courant, un lac ou un aquifère souterrain à condition de laisser le temps aux bactéries et autres organismes d'absorber leurs nutriments sans être en surnombre et déstabiliser l'écosystème aquatique.)

N'importe quelle activité provoquant la baisse d'un stock de ressources renouvelables, le remplissage d'un exutoire à pollution ou encore la diminution d'un stock de ressources non renouvelables sans que des ressources renouvelables de substitution soient prévues ne peut être durable. Tôt ou tard, cette activité devra ralentir. Lors des nombreux débats autour des règles de Daly, en milieu universitaire, en entreprise, entre des dirigeants politiques ou au sein de la société civile, nous n'avons jamais entendu quiconque les remettre en question. (Cela dit, nous avons rarement vu des personnes s'en inspirer sérieusement.) S'il existe des lois fondamentales relatives à la durabilité, ces règles doivent en faire partie. Et la question n'est pas de savoir si elles sont correctes, mais si l'économie mondiale les respecte et ce qui peut arriver si ce n'est pas le cas.

Nous allons nous servir des trois critères de Daly pour passer rapidement en revue plusieurs sources et exutoires utilisés par notre économie. Nous commencerons par les ressources renouvelables et nous nous poserons la question suivante : *les utilisons-nous plus vite qu'elles ne se régénèrent* ? Concernant les ressources non renouvelables, dont les stocks, par définition, sont condamnés à baisser, notre interrogation sera : *à quelle vitesse les matières de haute qualité sont-elles utilisées ? Quel coût véritable en énergie et en capitaux cela représente-t-il de les mettre à disposition de*

notre économie ? Enfin, nous examinerons la pollution et les déchets, ce qui nous conduira à ces questions : *fait-on en sorte qu'ils soient suffisamment inoffensifs ? S'accumulent-ils dans l'environnement ?*

Ces questions, nous y répondrons non à l'aide du modèle World3 (rien dans le présent chapitre ne relève de ce modèle), mais au moyen de données mondiales, dans la mesure où elles existent, source par source, exutoire par exutoire[2]. Dans ce chapitre, nous nous limiterons à quelques-unes des nombreuses interactions entre les sources et les exutoires (le fait, par exemple, que pour faire pousser davantage de cultures vivrières, il faille davantage d'énergie, ou que la pollution engendrée par une plus grande production d'énergie puisse modifier le climat et avoir des répercussions sur les rendements agricoles).

Les limites dont nous parlerons font partie de celles que les chercheurs connaissent aujourd'hui dans le monde. Rien ne nous assure qu'il s'agisse des limites les plus importantes. L'avenir nous réserve des surprises, certaines bonnes, d'autres moins. Les technologies que nous allons évoquer seront certainement améliorées, mais, d'un autre côté, de nouveaux problèmes vont apparaître, encore inconnus aujourd'hui.

Nous examinerons en détail l'état des besoins physiques fondamentaux de la planète et leurs perspectives. Notre analyse ne vous donnera pas une vision simple et univoque du positionnement de l'humanité par rapport aux limites de la croissance, mais elle vous aidera à vous prononcer sur la réalité de ces limites et sur l'impact que les politiques actuelles ont sur elles. Nous sommes conscients des lacunes des humains dans l'appréhension de ces limites, mais nous sommes convaincus que les données

2. Pour un examen plus récent, approfondi et systématique des limites globales les plus imminentes, voir Lester Brown, *Éco-économie*, Paris, Seuil, 2003, chapitres 2 et 3. Pour un examen plus large des limites physiques globales et des données à ce sujet, voir World Resources Institute, *World Resources 2000-2001 : People and Ecosystems : The Fraying Web of Life*, Oxford, Elsevier Science Ltd., 2002, partie 2, « Data Tables ».

présentées dans ce chapitre, vous aideront, vous aussi, à tirer les quatre conclusions suivantes :

L'économie humaine utilise aujourd'hui tant de ressources capitales et produit tant de déchets qu'elle n'est pas soutenable. Les sources se tarissent, les exutoires se remplissent et, pour certains, débordent. La plupart des flux ne peuvent être maintenus sur le long terme, même à leur débit actuel, *a fortiori* s'ils s'intensifient. Nous estimons que beaucoup vont atteindre un pic puis décliner au cours de ce siècle.

Ces flux élevés ne sont pas nécessaires. Des changements au niveau de la technique, des modes de répartition et des institutions pourraient les réduire fortement tout en maintenant et même en améliorant la qualité de vie moyenne des habitants de la planète.

Le fardeau que les humains font peser sur l'environnement dépasse d'ores et déjà les limites soutenables et ne pourra pas durer plus d'une génération ou deux. Conséquence : on constate déjà de nombreux impacts négatifs sur la santé humaine et sur l'économie.

Le véritable coût des matières ne fait qu'augmenter.

Le concept d'un fardeau humain pesant sur l'environnement est très complexe et difficile à quantifier. La meilleure approche à l'heure actuelle est celle que nous utilisons dans cet ouvrage : il s'agit de la notion d'empreinte écologique. Elle se définit comme l'impact total de l'humanité sur la nature, c'est-à-dire la somme de tous les effets de l'extraction des ressources, de l'émission de polluants, de la consommation d'énergie, de la destruction de la biodiversité, de l'urbanisation et des autres conséquences de la croissance physique. C'est un concept difficile à mesurer, mais de grands progrès ont été faits en ce sens ces dix dernières années et d'autres sont sans doute à venir.

Il existe une méthode pertinente, mentionnée dans la préface, qui consiste à convertir tout ce que les humains puisent dans l'écosystème mondial en nombre d'hectares de planète nécessaires pour que « ces services écologiques soient indéfiniment fournis ».

Or il y a un nombre fini d'hectares sur la planète. Cette méthode apporte donc une réponse à ceux qui se demandent si l'humanité demande plus que ce que la planète peut lui fournir. Selon la figure P-1, dans la préface des auteurs, la réponse est oui. Si l'on en croit cette mesure de l'empreinte écologique, au début du XXIe siècle, l'humanité avait besoin de 1,2 fois la surface de terres disponibles sur la planète. En d'autres termes, elle dépassait de 20 % la limite globale. Fort heureusement, il existe de nombreuses solutions pour atténuer cette pression, pour redescendre en deçà des limites et répondre aux besoins et aux attentes des humains de manière infiniment plus durable. Nous allons aborder un certain nombre de ces solutions dans les pages qui suivent[3].

Sources renouvelables

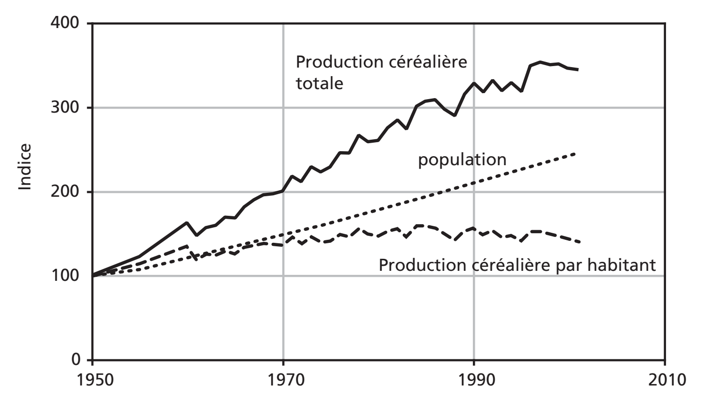
La nourriture, la terre, le sol

> *La plupart des terres agricoles de haute qualité sont déjà exploitées et nous connaissons le coût environnemental que représenterait la conversion en terres agricoles des forêts, des prairies et des zones humides qui restent…*
> *Une grande partie des sols restants sont moins productifs et plus fragiles.*
> *… Selon une analyse de l'érosion des sols au niveau mondial, la couche arable disparaît à l'heure actuelle, selon les régions, entre 16 et 300 fois plus vite qu'elle ne peut être remplacée.*
>
> – World Resources Institute, 1998

Entre 1950 et 2000, la production mondiale de céréales a plus que triplé, passant d'environ 590 à plus de 2 000 millions de tonnes par an. Entre 1950 et 1975, la production céréalière a augmenté de 3,3 % en moyenne par an, c'est-à-dire plus vite que la population, qui augmentait elle de 1,9 % chaque année (figure 3-2). Cependant,

3. D'autres solutions pour faciliter et accélérer la transition vers la durabilité sont présentées de façon rigoureuse par Lester Brown, *Éco*-économie, op. *cit.*, chapitres 4-12.

FIGURE 3-2 – Production céréalière mondiale



Les agriculteurs dans le monde ont produit plus de trois fois plus de céréales en 2000 qu'en 1950. Du fait de l'accroissement démographique, cependant, la production par habitant a atteint un pic au milieu des années 1980 et a légèrement baissé ensuite. La production céréalière mondiale par habitant reste néanmoins supérieure de 40 % à celle de 1950. **(Sources : FAO ; PRB)**

durant les dernières décennies, l'accroissement de la production céréalière a ralenti au point de passer en dessous du taux d'accroissement démographique. La production de céréales par habitant a connu un pic vers 1985 et n'a fait que baisser lentement depuis[4].

Nous disposons cependant d'assez de nourriture, du moins en théorie, pour nourrir correctement tous les humains. La quantité totale de céréales produites dans le monde en 2000 aurait permis à 8 milliards d'individus de vivre avec le minimum vital pour peu qu'elle ait été équitablement distribuée, qu'elle n'ait pas servi à nourrir les animaux, qu'elle n'ait pas été attaquée par les nuisibles ou qu'on ne l'ait pas laissée pourrir entre les phases de récolte et de consommation. Les céréales représentent à peu près

4. Lester R. Brown, « Feeding Nine Billion », *in* Lester Brown *et al.*, *State of the World 1999*, New York, W. W. Norton, 1998.

50 % de la production agricole mondiale (mesurée en calories). Si l'on y ajoute la production annuelle de tubercules, de légumes, de fruits, de poisson et de produits issus d'animaux élevés sur pâturage et non au grain, on a assez pour fournir aux 6 milliards d'habitants du début du XXIe siècle une alimentation saine et variée[5].

Les pertes post-récolte varient selon les cultures et les zones géographiques, allant de 10 à 40 %[6]. La distribution est tout sauf égalitaire et une grande partie de la production sert à nourrir les animaux et non les humains. Voilà pourquoi la faim persiste, alors que la théorie nous prouve que l'inverse est possible. Et selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 850 millions de personnes environ souffrent d'un manque chronique de nourriture[7].

Les personnes qui ont faim sont avant tout les femmes et les enfants. Dans les pays en développement, un enfant sur trois est dénutri[8]. Quelque 200 millions d'individus en Inde connaissent une faim chronique, ils sont plus de 200 millions en Afrique, 40 millions au Bangladesh et 15 millions en Afghanistan[9]. Environ neuf millions de personnes meurent chaque année de causes liées à la faim, ce qui fait en moyenne 25 000 décès par jour.

Jusqu'ici, le nombre de personnes souffrant de la faim est resté à peu près constant à mesure que la population a augmenté. On estime que le nombre annuel de décès dus à la faim a lentement

---

5. Selon nos calculs, en tablant sur des besoins de subsistance de 230 kg de céréales par personne et par an.

6. World Resources Institute, *World Resources 1998-99 : Environmental Change and Human Health*, Washington, DC, World Resources Institute, 1998.

7. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), *La sixième enquête mondiale sur l'alimentation*, Rome, FAO, 1996.

8. P. Pinstrup-Anderson, R. Pandya-Lorch et M. W. Rosengrant, *The World Food Situation : Recent Developments, Emerging Issues, and Long-Term Prospects*, Washington, DC, Institut international de recherche sur les politiques alimentaires, 1997.

9. Lester R. Brown, Michael Renner et Brian Halweil, *Vital Signs 1999*, New York, W. W. Norton, 1999.

baissé, ce qui représente un progrès considérable. Dans ce monde où la population croît et où les limites se font pressantes, le problème de la faim ne s'aggrave pas. Il reste cependant des poches de résistance de ce fléau et la malnutrition chronique touche des zones plus étendues qu'auparavant.

La faim ne persiste pas à cause des limites physiques imposées par notre planète, du moins pas encore. Nous pourrions faire pousser davantage de cultures vivrières. La figure 3-3 montre ainsi les rendements céréaliers dans différents pays et dans le monde. À cause des disparités de sols et de climats, on ne peut pas attendre de chaque hectare de terre qu'il ait un rendement aussi élevé que celui des zones les plus favorables. Mais la production pourrait sans aucun doute augmenter dans bien des endroits grâce à des techniques que l'on connaît déjà et qui sont très largement employées.

Dans une étude approfondie des sols et des climats de 117 pays d'Amérique latine, d'Afrique et d'Asie, la FAO a estimé que seuls 19 de ces pays ne parviendraient *pas* à nourrir leur population en l'an 2000 à partir des terres dont ils disposent, dans l'hypothèse où ils pourraient exploiter chaque hectare potentiellement arable et où ils obtiendraient les meilleurs rendements possibles techniquement. Toujours selon cette étude, si toutes les terres cultivables étaient allouées à la production de nourriture, s'il n'y avait pas d'érosion des sols, si les conditions climatiques et la gestion étaient idéales et si ces 117 pays faisaient un usage sans limite des intrants agricoles, ils pourraient multiplier par 16 leur production de nourriture[10].

10. G. M. Higgins *et al.*, *Potential Population Supporting Capacities of Lands in the Developing World*, Rome, FAO, 1982. Cette étude technique est résumée dans un rapport non technique de Paul Harrison, *Land, Food, and People*, Rome, FAO, 1984. Cette multiplication par 16 s'appuie sur des hypothèses extrêmement optimistes et n'est valable que pour les pays en développement, qui partent de rendements peu élevés. La FAO n'a pas mené d'étude similaire sur les terres des pays industrialisés.

Ces hypothèses sont bien sûr loin d'être réalistes. Étant donné les conditions climatiques et les pratiques agricoles, la nécessité d'utiliser les terres à d'autres fins que la production de nourriture (pour les forêts, les pâturages, l'habitat humain, la protection des bassins versants et de la biodiversité, entre autres), étant donné également les problèmes liés à l'écoulement des engrais et des pesticides, les limites à la production de nourriture sont considérablement plus basses en pratique qu'en théorie. Et, de fait, comme nous l'avons vu, la production céréalière par habitant baisse depuis 1985.

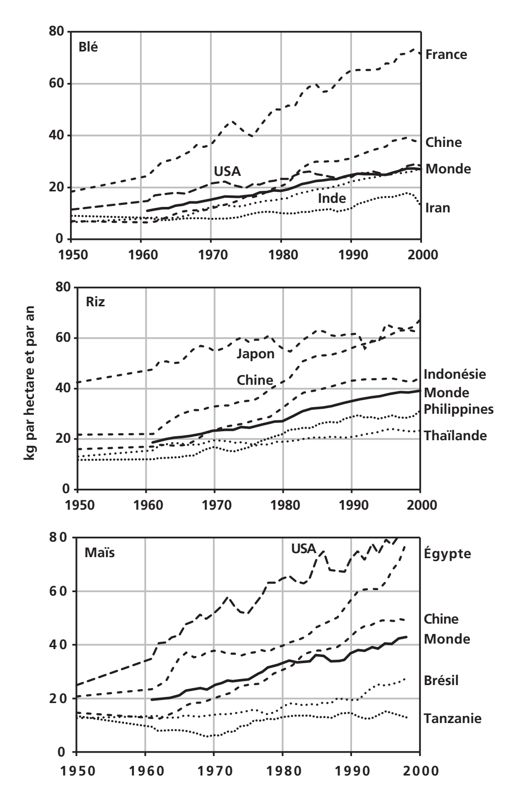
> *Depuis la Seconde Guerre mondiale, nous assistons à une remarquable hausse de la production et de la productivité agricoles dans les pays en développement. Si, dans de nombreuses régions, cette croissance s'est apparemment faite de façon soutenable, dans d'autres, elle a été le fruit de deux processus non durables : le défrichement de nouvelles terres présentant un potentiel productif moindre ou une plus grande vulnérabilité, et l'intensification de la production par l'exploitation excessive et la destruction des ressources de base du sol*[11].

La limite la plus évidente est la terre[12]. Les estimations quant à la surface de terre potentiellement cultivable sur la planète s'échelonnent entre deux et quatre milliards d'hectares, selon le

11. Sara J. Scherr, « Soil Degradation : A Threat to Developing-Country Food Security by 2020 ? », *IFPRI Discussion Paper 27*, Washington, DC, IFPRI, février 1999.

12. La nourriture fournie par la mer est encore plus limitée que celle qui nous vient de la terre et il fait encore moins de doute que son exploitation se situe au-delà des limites durables. Les projets futuristes en matière d'aliments non issus de la terre – aquaculture, levure en cuve, etc. – resteront des sources de production d'aliments marginales, principalement du fait de l'énergie et des capitaux qu'elles nécessitent et de la pollution qu'elles engendrent. Les cultures qui ne pousseraient pas dans la terre en exploitant l'énergie du soleil grâce à la photosynthèse seraient encore moins soutenables que notre système actuel. Quant aux cultures génétiquement modifiées, pour le moment du moins, elles semblent avoir davantage été mises au point pour résister aux nuisibles et aux herbicides et réduire l'utilisation d'intrants coûteux que pour augmenter les rendements.

FIGURE 3-3 – Rendements céréaliers



Les rendements du blé, du riz et du maïs sont élevés dans les pays industrialisés. Dans certains pays émergents ou en développement, comme la Chine, l'Égypte et l'Indonésie, ils augmentent rapidement. Dans d'autres, ils sont encore très bas, mais possèdent un énorme potentiel de progression. (Afin de lisser les variations climatiques annuelles, une moyenne des rendements présentés sur ces graphiques a été réalisée tous les trois ans.) **(Source : FAO)**

sens que l'on donne au terme « *cultivable* ». Environ 1,5 milliard d'hectares sont véritablement cultivés, une surface qui est restée quasi constante depuis 30 ans. L'augmentation de la production de nourriture vient presque entièrement d'une hausse des rende-

ments et non d'une expansion nette des surfaces. Mais cela ne signifie pas que les zones de terres cultivées soient entretenues. De nouvelles terres agricoles sont sans cesse mises en production, tandis que les terres autrefois productives sont abandonnées à l'érosion, à la salinisation, à l'urbanisation et à la désertification. Jusqu'ici, les pertes et les ajouts de terres se sont peu ou prou équilibrés, en surface si ce n'est en qualité. Étant donné que les meilleures terres sont généralement celles qui sont exploitées en premier, les sols jadis riches se dégradent tandis que des terres plus marginales sont exploitées[13].

Le Programmes des Nations Unies pour l'environnement a estimé, en 1986, qu'au cours du dernier millénaire, les humains avaient transformé environ deux milliards d'hectares de terre agricole productive en terres incultes[14], ce qui fait plus que l'ensemble des terres cultivées aujourd'hui. Quelque 100 millions d'hectares de terres irriguées ont été salinisés et 110 autres millions ont vu leur productivité baisser. La perte d'humus s'accroît : de 25 millions de tonnes par an avant la révolution industrielle, elle est passée à 300 millions de tonnes par an au cours des derniers siècles et a atteint 760 millions de tonnes par an ces 50 dernières années[15]. Non seulement cette perte d'humus diminue la fertilité du sol, mais elle contribue à l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

La première évaluation mondiale de l'érosion des sols d'après des études similaires menées par plusieurs centaines d'experts

---

13. Pour un excellent bilan des études sur la disparition des sols dans le monde, voir Sara J. Scherr, « Soil Degradation », *op. cit.*

14. Programme des Nations Unies pour l'environnement, « Farming Systems Principles for Improved Food Production and the Control of Soil Degradation in the Arid, Semi-Arid, and Humid Tropics », compte rendu d'une réunion d'experts cocommanditée par l'International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Hyderabad, Inde, 1986.

15. B. G. Rosanov, V. Targulian et D. S. Orlov, « Soils », *in* B. L. Turner *et al.*, *The Earth as Transformed by Human Action : Global and Regional Changes in the Biosphere Over the Past 30 Years*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990. Voir également Lester R. Brown, *Éco-économie*, *op. cit.*

régionaux a été publiée en 1994. Elle concluait que 38 % (562 millions d'hectares) des terres agricoles utilisées à l'époque avaient été dégradés (à quoi s'ajoutait 21 % des pâturages permanents et 18 % des surfaces boisées)[16]. Le degré de dégradation allait de léger à profond.

Nous n'avons pas trouvé de chiffres à l'échelle internationale concernant la conversion de terres agricoles en routes et en habitations, mais la perte doit être importante. On estime que la ville de Jakarta s'étend aux dépens de terres cultivées au rythme de 20 000 hectares par an. Le Viêtnam a perdu 20 000 hectares par an de rizières au profit du développement urbain. La Thaïlande a transformé 34 000 hectares de terres agricoles en parcours de golf entre 1989 et 1994. La Chine a sacrifié 6,8 millions d'hectares de terres arables à son développement entre 1987 et 1992, mais, dans le même temps, elle a converti 3,8 millions d'hectares de forêts et de pâturages en cultures. Quant aux États-Unis, ils couvrent d'asphalte environ 170 000 hectares de terres cultivées chaque année[17].

Conséquence de ce type d'évolution, deux sources renouvelables sont en train de diminuer. La première est la qualité des sols cultivés (épaisseur, quantité d'humus, fertilité). Cette perte de qualité restera sans doute longtemps invisible dans la production de nourriture, car les nutriments du sol peuvent être remplacés par les nutriments présents dans les engrais chimiques[18]. Ces derniers masqueront les dommages causés à la terre, mais pas indéfiniment. Ils constituent eux-mêmes un intrant non durable dans le système agricole, car ils retardent les signaux concernant

---

16. L. R. Oldeman, « The Global Extent of Soil Degradation », *in* D. J. Greenland et T. Szaboles (dir.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, Wallingford, UK, Commonwealth Agricultural Bureau International, 1994.

17. Tous les chiffres de ce paragraphe sont tirés de Gary Gardner, « Shrinking Fields : Cropland Loss in a World of Eight Billion », *Worldwatch Paper*, nº 131, Washington, DC, Worldwatch Institute, 1996.

18. World Resources Institute, *World Resources 1998-99*, *op. cit.*. On estime que la dégradation des sols entre 1945 et 1990 a réduit la production mondiale de nourriture de 17 % par rapport à ce qu'elle aurait pu être.

la fertilité de la terre. Or le retard est l'une des caractéristiques structurelles qui mènent au dépassement des limites.

La seconde source dans laquelle nous puisons de façon non soutenable est la terre en elle-même. Puisque des millions d'hectares sont dégradés et abandonnés et que la surface de terres cultivées reste à peu près la même, cela signifie que la superficie de terres potentiellement arables (essentiellement les forêts, comme nous allons le voir plus loin dans ce chapitre) diminue, tandis que la surface de terres incultes et improductives augmente. Nous produisons donc le flot d'aliments qui subvient aux besoins de la population humaine en occupant sans cesse de nouvelles terres et en abandonnant derrière nous des sols épuisés, salinisés, érodés ou goudronnés. Il faut de toute évidence mettre un terme à une telle pratique.

Si la population croît de façon exponentielle et que la surface de terres cultivées reste à peu près la même, c'est donc que la surface cultivée par personne diminue. Elle est effectivement passée de 0,6 hectare par personne en 1950 à 0,25 hectare en 2000. Et s'il a été possible de continuer à nourrir une population en augmentation à partir d'une surface de terre plus réduite, c'est seulement grâce à l'amélioration des rendements. Un hectare de riz produisait en moyenne 2 tonnes par an en 1960 et 3,6 tonnes en 1995 ; dans des conditions expérimentales, des rendements extrêmes de 10 tonnes ont même été atteints. Aux États-Unis, le rendement du maïs est passé d'une moyenne de 5 tonnes par hectare en 1967 à plus de 8 tonnes en 1997, les meilleurs producteurs atteignant 20 tonnes lors de certaines années exceptionnelles.

Quel enseignement tirer de toutes ces données en ce qui concerne l'éventuelle rareté des terres agricoles à l'avenir ? La figure 3-4 propose différents scénarios pour le siècle en cours. Elle montre les liens étroits entre la surface totale de terres cultivées, l'accroissement démographique, les rendements moyens et les différents régimes alimentaires.

La partie grisée représente la surface totale de terres cultivables, comprise entre les 1,5 milliard d'hectares actuels et la limite

supérieure théorique de 4 milliards d'hectares. Les terres de la partie haute de cette zone grisée seront bien moins productives que celles situées à sa base. La surface totale de terres cultivées pourrait naturellement baisser, mais nous formulons l'hypothèse qu'il n'y aura plus aucune perte de terres. Pour chaque scénario, nous partons du principe que la population mondiale va croître conformément aux prévisions médianes des Nations Unies.

> *C'est un cas de figure étonnant. Nous continuons régulièrement à progresser, mais quand on examine ce qui se fait de mieux, on constate que le rendement du maïs ne semble pas avoir changé en 25 ans. Le rendement annuel moyen continue à augmenter de 90 kg/ha, mais les investissements dans la recherche sur la culture de cette céréale ont eux été multipliés par quatre. Quand chaque pas en avant devient plus difficile à faire, cela signifie que les résultats sont moins bons.*
>
> – Kenneth S. Cassman, 1999

> *Je n'arrive pas à voir de quel côté une augmentation* [des rendements] *va bien pouvoir venir au cours des 50 prochaines années.*
>
> – Vernon Ruttan, 1999

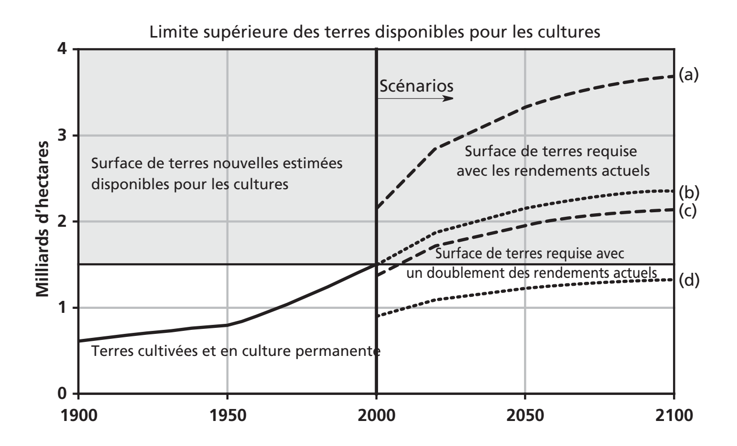
> *Les rendements de riz maximums sont les mêmes depuis 30 ans. Nous stagnons actuellement en termes de biomasse et il n'est pas facile de trouver un remède à cela.*
>
> – Robert S. Loomis, 1999

De toute évidence, la progression des rendements devient plus lente et plus coûteuse. D'ailleurs, certains experts agricoles américains redoutaient déjà en 1999 une « stagnation des rendements »[19]. L'érosion, le changement climatique, la cherté des combustibles fossiles, la baisse de niveau des nappes phréatiques, entre autres, pourraient également entraîner une diminution des rendements, mais dans la figure 3-4, nous partons de l'hypothèse que les rendements seront maintenus ou doubleront au cours du siècle.

---

19. Les citations de Cassman, Ruttan et Loomis viennent de Charles C. Mann, « Crop Scientists Seek a New Revolution », *Science*, vol. 283, nº 5400, 15 janvier 1999.

FIGURE 3-4 – Scénarios possibles pour l'avenir de l'agriculture



La surface des terres cultivables au XXIe siècle sera sans doute comprise entre 1,5 et 4 milliards d'hectares, ce qui est représenté par la partie grisée. Nous partons ici de l'hypothèse que l'accroissement démographique va suivre les prévisions médianes des Nations Unies. Les différents scénarios post-2000 montrent la surface de terres requise pour produire des aliments selon les rendements actuels à l'hectare, selon un doublement de ces rendements, selon que l'on maintient les normes alimentaires actuelles et selon que l'on généralise le régime alimentaire moyen d'un habitant d'un pays d'Europe de l'Ouest en 2000. **(Sources : Nations unies, PRB, FAO, G. M. Higgins et al.)**

Dans l'hypothèse où les rendements actuels seraient maintenus, la courbe (a) représente une projection des hectares de terres nécessaires pour nourrir la population selon les normes moyennes d'alimentation en Europe de l'Ouest en l'an 2000. La courbe (b) représente les terres nécessaires si l'on continue au cours de ce siècle selon le régime alimentaire actuel inadapté des habitants de la planète. Les courbes (c) et (d) représentent les mêmes informations que les courbes (a) et (b), dans l'hypothèse où les rendements doubleraient.

La figure 3-4 montre bien à quelle vitesse la croissance exponentielle de la population peut faire basculer la planète d'une

situation où les terres sont abondantes à une situation où elles sont rares.

Mais cette figure montre également le nombre de solutions d'adaptation en fonction de la résilience des ressources naturelles et de l'adaptabilité technique et sociale des humains. Si on ne perdait plus de terres, si les rendements doublaient dans le monde, si les terres dégradées pouvaient être restaurées, alors chacun des 6 milliards d'habitants que compte cette planète pourrait avoir assez à manger et chacun des 9 milliards prévus pour 2050 aussi. En revanche, si l'érosion augmente, si les taux d'irrigation ne peuvent être maintenus, s'il s'avère trop coûteux de développer ou de restaurer des terres, trop difficile ou trop risqué sur le plan environnemental de multiplier par deux les rendements mondiaux moyens et si la croissance démographique ne se stabilise pas et fait mentir les prévisions des Nations Unies, l'alimentation pourrait rapidement devenir un grave problème, au niveau local et international. La raréfaction des aliments nous paraîtrait soudaine, mais elle ne serait que la conséquence de la poursuite de tendances exponentielles.

L'exploitation non durable des ressources agricoles est la conséquence de nombreux facteurs, comme la pauvreté, la désespérance, l'étalement urbain, le surpâturage et la surexploitation des sols, l'ignorance, les récompenses économiques attribuées aux méthodes de production à court terme plutôt qu'aux gestions à long terme, et l'incompétence des responsables en écologie et plus particulièrement en écologie des sols.

Il existe d'autres limites que les sols et la terre à la production de nourriture, parmi lesquelles figurent l'eau (nous y reviendrons très prochainement), l'énergie et les sources et exutoires des produits chimiques agricoles[20]. Dans plusieurs régions du monde,

20. Pour un excellent examen de tous ces facteurs et de leur possible impact sur l'agriculture de demain, voir Rosamond Naylor, « Energy and Resource Constraints on Intensive Agricultural Production », *Annual Reviews of Energy and Environment*, vol. 21, 1996.

certaines de ces limites sont déjà dépassées. Les sols s'érodent, l'irrigation fait baisser le niveau des nappes phréatiques et les ruissellements des champs polluent les eaux de surface et les eaux souterraines. Les grandes entités hydrologiques de la planète contiennent ainsi 61 zones mortes d'envergure, c'est-à-dire des zones où les écoulements de substances nutritives, dus avant tout à l'utilisation d'engrais et à l'érosion du sol, tuent toute vie aquatique ou presque. Certaines de ces zones mortes sont permanentes, d'autres apparaissent seulement l'été, après que les ruissellements du printemps ont entraîné les résidus d'engrais venus des cultures situées en amont. La zone morte du Mississippi fait 21 000 km^2, soit la surface de l'État du Massachusetts[21]. Les pratiques agricoles qui provoquent de tels dégâts écologiques ne sont pas soutenables. Pas plus qu'elles ne sont nécessaires.

Dans de nombreuses régions, les sols ne s'érodent pas, la terre n'est pas laissée à l'abandon et les produits chimiques ne polluent ni les sols ni l'eau. Les méthodes agricoles qui préservent ces derniers et les enrichissent – cultures en terrasses, labour en courbes de niveau, compostage, cultures de couverture, polyculture et assolement – sont connues et pratiquées depuis des siècles. D'autres méthodes, particulièrement applicables en zone tropicale, comme la culture en bandes et l'agroforesterie, s'avèrent efficaces dans des stations expérimentales ou sur le terrain[22]. Dans des exploitations de toutes sortes, en zones tempérées comme en zones tropicales, on obtient des rendements élevés de façon durable sans utiliser de grandes quantités d'engrais de synthèse ni de pesticides, et souvent même sans en utiliser du tout.

Et il est bien question ici de *rendements* élevés. C'est un fait avéré : pour être agriculteur « biologique », pas besoin de revenir à l'âge de pierre ni de se cantonner aux méthodes et à la faible

---

21. Janet McConnaughey, « Scientists Seek Ways to Bring Marine Life Back to World's 'Dead Zones' », *Los Angeles Times*, 8 août 1999.

22. Voir, par exemple, Michael J. Dover et Lee M. Talbot, *To Feed the Earth : Agro-Ecology for Sustainable Development*, Washington, DC, World Resources Institute, 1987.

productivité d'il y a 100 ans. La plupart de ces agriculteurs utilisent des variétés à haut rendement, des machines permettant de travailler moins et des méthodes écologiques et sophistiquées de fertilisation et de lutte contre les nuisibles. Leurs rendements équivalent le plus souvent à ceux de leurs collègues non biologiques et leurs profits sont généralement plus élevés[23]. Si une petite fraction de la recherche consacrée aux intrants chimiques et aux modifications génétiques était allouée aux méthodes de production biologiques, l'agriculture bio serait encore plus productive.

> *Comparées à l'agriculture intensive conventionnelle, les alternatives « biologiques » peuvent améliorer la fertilité des sols et ont moins d'effets néfastes sur l'environnement. Ces alternatives permettent en outre d'obtenir des rendements équivalents à ceux des méthodes classiques*[24].

Une agriculture durable est non seulement possible, mais elle est déjà mise en pratique partout dans le monde. Des millions d'agriculteurs emploient des techniques saines pour la terre et s'aperçoivent qu'à mesure que les sols s'améliorent, les rendements augmentent. Quant aux consommateurs, dans les pays riches au moins, ils sont de plus en plus demandeurs d'aliments produits de cette façon et sont prêts à les payer plus cher. Aux États-Unis et en Europe, le marché des produits biologiques s'est développé de 20 à 30 % par an au cours des années 1990. Et en 1998, les ventes d'aliments et de boissons biologiques sur les principaux marchés du monde s'élevaient à 13 milliards de dollars[25].

---

23. La littérature portant sur l'agriculture « biologique », « à faible utilisation d'intrants » ou « écologique » est abondante. Pour consulter des exemples du monde entier, aller sur le site de l'International Federation of Organic Agriculture Movements sur <www.ifoam.org>.

24. David Tilman, « The Greening of the Green Revolution », *Nature*, vol. 396, n° 6708, 19 novembre 1998 ; voir également L. E. Drinkwater, P. Wagoner et M. Sarrantonio, « Legume-Based Cropping Systems Have Reduced Carbon and Nitrogen Losses », *Nature*, vol. 396, n° 6708, 19 novembre 1998

25. FoodReview n° 24-1, Washington, DC, Food and Rural Economics Division, US Department of Agriculture, juillet 2001.

Pourquoi n'avons-nous pas parlé du potentiel des cultures génétiquement modifiées ? Parce que le débat persiste. Et on ne sait toujours pas avec certitude si les manipulations génétiques sont nécessaires pour nourrir la planète, ni si elles sont soutenables. Ce n'est pas parce qu'il n'y a pas assez de nourriture à acheter que les populations ont faim, c'est parce qu'elles n'ont pas l'argent nécessaire. Donc produire davantage d'aliments onéreux ne les aidera pas. Et si le génie génétique est susceptible d'accroître les rendements, il existe d'autres moyens, encore non exploités, de les accroître sans interventions sur le génome. Celles-ci ont en effet le double inconvénient de relever de technologies de pointe, donc d'être inaccessibles à l'agriculteur moyen, et de présenter des risques environnementaux. L'engouement pour les cultures issues des biotechnologies est déjà en train de subir un inquiétant retour de manivelle, tant sur les plans écologique et agricole que sur celui de l'opinion[26].

La quantité de nourriture produite aujourd'hui suffirait à nourrir plus que correctement la planète entière. Et on pourrait en produire davantage. On pourrait le faire en polluant moins, sur une surface de terres plus réduite et en utilisant moins de combustibles fossiles ; des millions d'hectares pourraient ainsi être rendus à la nature et pourraient constituer une source de fibres ou de fourrage ou servir à la production d'énergie. Et cela pourrait être fait de façon à ce que les agriculteurs soient reconnus à leur juste valeur, en tant que nourrisseurs de la planète. Mais jusqu'ici, la volonté politique a souvent fait défaut et, en réalité, dans de nombreuses régions du monde, les sols, la terre et les sources nutritives d'aliments dépérissent et, avec eux, les économies et les communautés agricoles. Dans ces régions, vu les pratiques actuelles, la production agricole a dépassé de nombreuses limites. Et à moins que des changements, parfaitement faisables, interviennent rapidement, la population humaine en

26. Voir Donella H. Meadows, « Poor Monsanto », *in Whole Earth Review*, été 1999.

augmentation devra tenter de se nourrir grâce à un plus petit nombre d'agriculteurs travaillant à partir de ressources en baisse.

L'eau

> *Dans de nombreux pays, industrialisés ou en développement, les modes actuels d'utilisation de l'eau ne sont pas durables… La planète est confrontée dans plusieurs régions à des problèmes de disponibilité et de qualité de l'eau qui s'aggravent… Ces problèmes précarisent l'une des ressources sur lesquelles la société humaine s'est bâtie.*
>
> – UN Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources, 1997

L'eau douce n'est pas présente partout sur la planète. C'est une ressource avant tout régionale, disponible dans certains bassins versants seulement, si bien que les limites la concernant prennent des formes très diverses. Dans certains bassins, ces limites sont saisonnières et dépendent de la faculté du sol à stocker l'eau pendant les périodes sèches. Dans d'autres zones, elles sont déterminées par la vitesse d'infiltration des eaux souterraines, par la vitesse de fonte des glaces ou encore par la capacité des sols forestiers à emmagasiner l'eau. Et comme l'eau est à la fois une source mais aussi un exutoire, son utilisation peut également être limitée par son degré de pollution en amont ou lors de son parcours souterrain.

Le caractère intrinsèquement régional de l'eau douce n'empêche pas de procéder à des évaluations au niveau mondial, évaluations qui sont de plus en plus inquiétantes. L'eau est à la fois la ressource la moins remplaçable et la plus vitale. Les limites la concernant ont des répercussions sur d'autres flux nécessaires : aliments, énergie, ressources halieutiques et vie sauvage. L'extraction d'autres ressources – aliments, minerais et produits forestiers – peut à son tour affecter la disponibilité ou la qualité de l'eau. Dans un nombre de plus en plus important de bassins à travers le monde, il ne fait aucun doute que les limites sont d'ores et déjà dépassées. Dans certains des pays les plus pauvres, mais

aussi dans certains des plus riches, les prélèvements d'eau par habitant sont en baisse du fait de problèmes environnementaux, d'élévation des coûts ou de la raréfaction de la ressource.

La figure 3-5 a une valeur purement illustrative, car c'est une synthèse à l'échelle mondiale de nombreux bassins hydrographiques régionaux. On pourrait cependant établir un graphique similaire par région avec les mêmes caractéristiques : une limite, un certain nombre de facteurs qui peuvent repousser ou au contraire abaisser cette limite, et une progression en direction de cette limite et parfois au-delà.

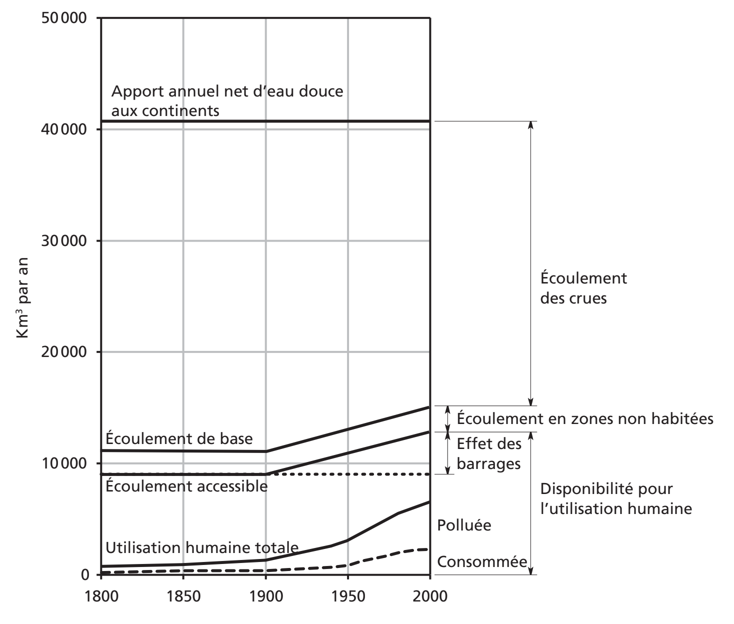
En haut du graphique figure la limite physique supérieure à l'utilisation de l'eau par l'homme, c'est-à-dire le flux annuel total des courants et des fleuves du monde entier (en incluant l'alimentation de tous les aquifères souterrains). C'est la source renouvelable dans laquelle est puisée l'intégralité ou presque des intrants en eau douce dans l'économie humaine. Cela représente une quantité considérable d'eau : 40 700 km^3 par an, soit un volume suffisant pour remplir les cinq grands lacs d'Amérique du Nord tous les quatre mois. Cette limite peut sembler très éloignée étant donné les prélèvements humains actuels qui dépassent à peine 5 % de ce total, soit 2 290 km^3 par an[27].

Dans la pratique, cependant, cet écoulement d'eau douce ne peut pas être exploité dans son intégralité. Il est pour une grand part saisonnier. En effet, 29 000 km^3 d'eau se déversent chaque année dans la mer lors des crues, ce qui ne laisse que 11 000 km^3 d'eau disponibles tout au long de l'année, soit la somme des flux d'alimentation des cours d'eau et des nappes souterraines.

La figure 3-5 montre que les humains repoussent la limite des écoulements en construisant des barrages pour recueillir les eaux de crue. À la fin du XXe siècle, les barrages avaient permis d'augmenter la quantité d'écoulements exploitables d'environ

27. Sandra Postel, Gretchen C. Daily et Paul R. Ehrlich, « Human Appropriation of Renewable Fresh Water », *Science*, vol. 271, n° 5250, 9 février 1996. Tous les chiffres de la figure 3-5 sont tirés de cet article.

FIGURE 3-5 – Ressources d'eau douce



Ce graphique présentant les réserves et l'utilisation mondiales d'eau douce montre d'une part à quelle vitesse l'augmentation de la consommation et de la pollution nous rapproche de la quantité totale d'eau accessible et d'autre part le rôle essentiel que jouent les barrages dans la stabilité des réserves.

3 500 km³ par an[28]. Les barrages inondent bien entendu les terres et il s'agit souvent de terres agricoles de très bonne qualité. Et ils permettent de produire de l'électricité. Ils augmentent également l'évaporation du bassin fluvial, ce qui réduit les écoulements nets et modifie les écosystèmes riverains et aquatiques. Les barrages finissent tôt ou tard par s'envaser, si bien qu'ils ne représentent pas une source d'approvisionnement durable ; ils induisent en

28. La capacité totale des retenues d'eau conçues par l'homme est d'environ 5 500 km³, mais un peu plus de la moitié seulement est disponible de façon soutenable.

outre un temps de réaction à très long terme par rapport aux limites, avec de nombreux effets secondaires positifs et négatifs.

Il existe d'autres méthodes que les barrages pour repousser la limite des quantités d'eau disponibles : on peut par exemple procéder à la désalinisation de l'eau de mer ou transporter l'eau sur de longues distances. Cela peut entraîner d'importants changements localement, mais ces méthodes sont gourmandes en énergie et coûtent cher. Elles ont pour l'instant une portée trop limitée pour se détacher sur un graphique à l'échelle planétaire[29].

Les flux durables d'eau douce ne se situent pas tous dans les zones habitées. Le bassin amazonien représente ainsi 15 % des écoulements mondiaux, mais n'abrite que 0,4 % de la population de la planète. De même, les cours d'eau du grand nord de l'Amérique et de l'Eurasie charrient 1 800 km^3 d'eau par an dans des régions très peu peuplées. Les écoulements réguliers difficilement accessibles pour l'humain s'élèvent ainsi à environ 2 100 km^3 par an.

Si l'on prend les 11 000 km^3 de flux durables, plus les 3 500 que l'on doit aux barrages, moins les 2 100 qui sont inaccessibles, cela laisse 12 400 km^3 de flux durables accessibles par an. Il s'agit là de la limite supérieure prévisible de réserves renouvelables d'eau douce dont l'humain peut disposer[30].

29. En 1996, la capacité mondiale de désalinisation de l'eau s'élevait à 6,5 km^3 par an, ce qui représente environ 0,1 % de toute l'eau utilisée par l'homme. La désalinisation coûte cher et consomme beaucoup d'énergie. Sept des 10 pays possédant la plus grande capacité de désalinisation se situaient dans le golfe Persique, région où les autres sources d'eau douce sont rares mais où l'énergie tirée des combustibles fossiles, non renouvelables, est bon marché. Peter H. Gleick, *The World's Water 1998-99*, Washington, DC, Island Press, 1999.

30. Cette limite pourrait être repoussée, et va sans doute l'être, par la construction de nouveaux barrages, mais les sites les plus accessibles et pouvant accueillir les plus grands barrages sont déjà en grande partie exploités. De plus en plus de voix s'élèvent en outre contre les barrages du fait de leur impact sur les terres agricoles, les habitations humaines et la vie sauvage. Voir à ce propos le rapport final de la Commission mondiale des barrages intitulé *Dams and Development : A New Framework for Decision-Making*, Londres, Earthscan, 2000.

Les prélèvements humains destructeurs (c'est-à-dire lorsque l'eau n'est pas rendue aux courants ni aux nappes souterraines parce qu'elle s'évapore ou est incorporée à des cultures ou des produits) s'élèvent à 2 290 km³ par an. D'autre part, 4 490 km³ d'eau sont utilisés pour diluer ou emporter la pollution. L'ensemble fait un total de 6 780 km³ par an, soit un tout petit peu plus que la moitié de tous les écoulements d'eau douce durables.

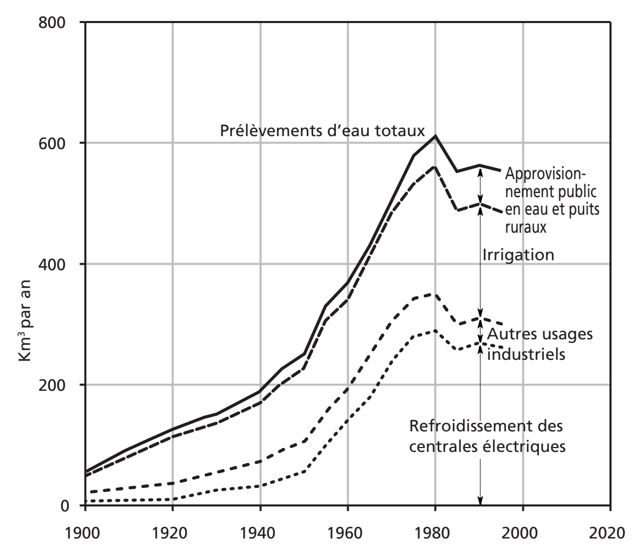
Cela signifie-t-il que nous pourrions multiplier par deux notre utilisation d'eau ? Un tel doublement est-il susceptible de se produire ?

Si la demande moyenne par habitant n'évoluait pas et que la population atteignait les 9 milliards d'individus en 2050 comme le prévoient pour l'heure les Nations Unies, les humains prélèveraient 10 200 km³ d'eau par an, c'est-à-dire 82 % des écoulements durables d'eau douce dans le monde. Si non seulement la population mais aussi la demande augmentaient, nous serions confrontés à de graves restrictions bien avant 2100. Tout au long du XXe siècle, les prélèvements en eau ont progressé environ deux fois plus vite que la population[31]. Mais cette ressource se raréfiant, il est probable que la consommation par habitant stagne voire chute. La courbe des prélèvements accuse d'ores et déjà un net ralentissement et, à certains endroits, elle est même descendante. Or la consommation d'eau dans le monde est inférieure de moitié à ce qu'on avait prévu il y a 30 ans en extrapolant les courbes exponentielles[32].

Après avoir doublé tous les 20 ans durant le XXe siècle, les prélèvements d'eau aux États-Unis ont connu un pic en 1980 ; depuis, ils ont baissé d'environ 10 % (figure 3-6). Les raisons de cette baisse sont nombreuses et sont toutes conformes à ce qui survient quand une économie est face à une raréfaction de l'eau. L'utilisation de l'eau par l'industrie a chuté de 40 %, en partie du fait de la délocalisation de l'industrie lourde vers d'autres régions

31. World Resources Institute, *World Resources 1998-99*, *op. cit.*
32. Peter Gleick, *The World's Water*, *op. cit.*

FIGURE 3-6 – La consommation d'eau aux États-Unis



Les prélèvements en eau des États-Unis ont augmenté entre le début du XXe siècle et les années 1980 à un rythme moyen de 3 % par an. Depuis, ils ont légèrement diminué, puis se sont stabilisés. **(Source : P. Gleick)**

du monde, mais aussi à la faveur d'une réglementation sur la qualité de l'eau qui a rendu son utilisation efficiente, son recyclage et son traitement avant rejet intéressants sur le plan économique ou obligatoires (ou les deux). L'utilisation de l'eau pour l'irrigation a baissé grâce à une plus grande efficience et grâce au fait que les villes, en plein développement, se sont mises à racheter de l'eau aux agriculteurs (diminuant en cela la surface de terres consacrées à la production de nourriture). La consommation des villes a augmenté, mais uniquement du fait de la croissance démographique. La consommation par habitant a, elle, chuté, surtout dans les zones arides du pays où l'augmentation du prix de l'eau a favorisé l'utilisation de dispositifs plus économes[33].

33. *Ibid.*

Si l'approvisionnement en eau par personne a baissé aux États-Unis, il reste néanmoins très élevé avec 1 500 m^3 par an. Un habitant d'un pays en développement ne consomme en moyenne qu'un tiers de ce volume et un habitant de l'Afrique subsaharienne, un dixième seulement[34]. Un milliard d'individus n'ont toujours pas accès à l'eau potable et un habitant sur deux dans le monde n'a pas accès aux installations sanitaires de base[35]. La demande en eau de ces populations doit et va augmenter. Malheureusement, elles habitent certaines des régions les plus dépourvues d'eau.

> *Un tiers environ des habitants de la planète vit dans des pays touchés par un stress hydrique modéré à élevé, résultant en partie de l'augmentation de la demande, engendrée par la croissance de la population et par les activités humaines. En 2025, pas moins des deux tiers de la population mondiale vivront dans des conditions de stress hydrique. Les pénuries d'eau et la pollution engendrent des problèmes de santé publique à grande échelle, freinent le développement économique et agricole, et nuisent à une grande variété d'écosystèmes. Elles pourraient menacer la sécurité alimentaire mondiale et conduire à une stagnation économique dans de nombreuses régions du monde*[36].

Les fleuves que sont le Colorado, le Huang He, le Nil, le Gange, l'Indus, le Chao Phraya, le Syr-Daria et l'Amou-Daria subissent tellement de prélèvements pour l'irrigation et la consommation urbaine que leur lit s'assèche pendant une partie de l'année, voire pendant l'année entière. Dans les États indiens agricoles du Pendjab et de l'Haryana, les nappes phréatiques baissent de 50 centimètres chaque année. La Chine du Nord surexploite ses puits de 30 km^3 par an (ce qui explique entre autres que le Huang He s'assèche). L'aquifère de l'Ogalalla, qui

---

34. Programme des Nations Unies pour le développement, *Rapport mondial sur le développement humain 1998*, *op. cit.*

35. Peter Gleick, *op. cit.*

36. UN Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World, 1997.

fournit un cinquième des eaux d'irrigation aux États-Unis, est surexploité à hauteur de 12 km^3 par an. Sa baisse a jusqu'ici privé d'irrigation un million d'hectares de terres agricoles. Dans la vallée centrale de Californie, où pousse la moitié des fruits et légumes du pays, on puise de façon excessive – un km^3 par an – dans les eaux souterraines. Et à travers toute l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, l'eau est pompée dans des nappes aquifères s'étendant sous le désert, or ces nappes se rechargent difficilement, voire pas du tout[37].

> *La surexploitation des nappes souterraines s'accélère. Elles sont exploitées de façon non durable sur tous les continents sauf en Antarctique.*
>
> – Peter Gleick, *The World's Water 1998-99*

On ne peut pas, de façon durable, pomper les nappes d'eau souterraine plus vite qu'elles ne se réalimentent. Les activités humaines qui dépendent de ces nappes vont soit devoir redescendre à un niveau correspondant à leur rythme de réalimentation, soit devoir purement et simplement s'arrêter si le pompage excessif détruit l'aquifère en laissant l'eau salée s'infiltrer ou en provoquant un affaissement du sol. Au départ, les pénuries d'eau ont des répercussions au niveau local avant tout, mais à mesure qu'elles touchent un nombre toujours plus grand de pays, les conséquences deviennent internationales. Et l'une des premières d'entre elles peut être l'augmentation du prix des céréales.

> *Les pays pauvres en eau répondent souvent aux besoins grandissants des villes et de l'industrie en puisant dans l'eau qui servait à l'irrigation et en important des céréales pour compenser la baisse de la production qui en résulte. Étant donné qu'une tonne de céréales équivaut à mille tonnes d'eau, l'importation de céréales est le moyen le plus efficient d'importer de l'eau… Si des conflits militaires au sujet de l'eau sont toujours possibles, la concurrence à venir concernant cette ressource va plus vraisemblablement se jouer sur les*

37. On pourra retrouver ces exemples et bien d'autres dans Sandra Postel, *Pillar of Sand : Can the Irrigation Miracle Last ?*, New York, W. W. Norton, 1999.

> *marchés céréaliers mondiaux… L'Iran et l'Égypte importent d'ores et déjà plus de blé que le Japon, pourtant leader en la matière en temps normal. Ces importations représentent au moins 40 % de la consommation totale de céréales dans ces deux pays… Bien d'autres pays pauvres en eau importent eux aussi une grande partie de leurs céréales. Le Maroc importe ainsi la moitié des siennes, l'Algérie et l'Arabie saoudite, plus de 70 %, le Yémen, près de 80 % et Israël, plus de 90 %… Quant à la Chine, elle va bientôt devoir se tourner vers les marchés céréaliers mondiaux*[38].

Les conséquences auxquelles est confrontée une société qui dépasse les limites en matière d'eau dépendent de son degré de richesse, de l'éventuelle présence de voisins riches en eau et de ses rapports avec ces voisins. Les pays riches ont les moyens d'importer des céréales. Les régions riches qui ont des voisins coopératifs, telles que la Californie du Sud, peuvent construire des canaux, des pipelines et des pompes pour importer l'eau. (Même si, dans ce cas, certains voisins commencent à vouloir récupérer leur eau.) Les pays riches qui disposent de grandes réserves de pétrole, comme l'Arabie saoudite, peuvent utiliser l'énergie fossile pour désaliniser l'eau de mer (tant qu'il reste des combustibles fossiles). Les pays riches qui n'ont ni voisins coopératifs ni combustibles fossiles, comme Israël, peuvent élaborer d'ingénieuses technologies pour utiliser chaque goutte d'eau avec le maximum d'efficience et orienter leur économie vers les secteurs les moins gourmands en eau. Certains pays peuvent utiliser la force militaire pour exproprier leurs voisins ou s'assurer l'accès à leurs ressources en eau. Quant aux sociétés qui ne possèdent aucun de ces atouts, elles doivent mettre en place une réglementation et un rationnement draconiens, faute de quoi elles seront confrontées à la famine et/ou à des conflits internes autour de l'eau[39].

---

38. Lester R. Brown, « Water Deficits Growing in Many Countries », *Eco-Economy Update*, Washington, DC, Earth Policy Institute, 6 août 2002.

39. Pour des études de cas, voir Malin Falkenmark, « Fresh Waters as a Factor in Strategic Policy and Action », *in* Arthur H. Westing (dir.), *Global Resources and International Conflict*, Oxford, Oxford University Press, 1986.

Comme pour les produits alimentaires, il existe de nombreuses possibilités de se rapprocher d'une exploitation durable de l'eau, non pas en essayant de produire plus, mais en utilisant bien plus efficacement de moindres quantités. Voici quelques-unes de ces possibilités[40] :

- *Choisir la qualité de l'eau en fonction de son utilisation*. Pour les chasses d'eau et l'arrosage des pelouses, utiliser par exemple les eaux usées de l'évier plutôt que de l'eau potable.
- *Opter pour l'irrigation goutte-à-goutte*, qui peut réduire la consommation d'eau de 30 à 70 % tout en augmentant les rendements de 20 à 90 %.
- *Utiliser des robinets, des toilettes et des lave-linge à faible débit*. La consommation moyenne d'un ménage étatsunien, qui s'élève à 0,3 m^3 d'eau par personne et par jour, pourrait être réduite de moitié grâce à des appareils à consommation d'eau efficiente, appareils qui sont à la fois disponibles sur le marché et abordables financièrement.
- *Réparer les fuites*. On n'imagine pas le nombre d'autorités municipales en charge de l'eau qui dépensent toujours plus d'argent pour s'approvisionner, alors que pour un coût ridicule, elles pourraient obtenir autant en réparant les fuites. Une ville moyenne des États-Unis perd environ un quart de son eau courante à cause de fuites.
- *Planter des végétaux adaptés au climat :* ne pas, par exemple, faire pousser dans le désert des cultures qui réclament beaucoup d'eau comme la luzerne ou le maïs, et aménager le paysage à l'aide de plantes natives qui n'ont pas besoin d'être arrosées.
- *Recycler l'eau*. Certaines industries, particulièrement en Californie, État pauvre en eau, ont mis au point des techniques efficientes et rentables pour récupérer l'eau, la purifier et la réutiliser.

---

40. Ces exemples et ces chiffres sont tirés de Poster, Pillar, et de Paul Hawken, Amory Lovins et Hunter Lovins, *Natural Capitalism : comment réconcilier économie et environnement*, Paris, Scali, 2008, chapitre 11.

- *Collecter les eaux de pluie dans les zones urbaines.* Des citernes ou des dispositifs de collecte de l'eau installés sur les toits peuvent recueillir et permettre d'exploiter autant d'eau de ruissellement qu'un grand barrage pour un coût bien moindre.

L'un des meilleurs moyens de mettre en œuvre ces bonnes pratiques est de cesser de subventionner l'eau. Si le prix de l'eau intégrait, ne serait-ce que partiellement, le coût financier, social et environnemental de la mise à disposition de cette eau, on en ferait automatiquement une consommation plus raisonnée. Les villes de Denver et de New York se sont aperçues qu'en mesurant à l'aide d'un simple compteur la consommation de l'eau de ville et en appliquant un tarif qui augmente avec le taux d'utilisation, la consommation des ménages baissait de 30 à 40 %.

Et puis, il y a le changement climatique (dont nous reparlerons plus longuement). Si les humains ne font rien, il peut modifier les cycles hydrologiques, les courants océaniques, le régime des précipitations et des ruissellements, l'efficacité des barrages et des systèmes d'irrigation, ainsi que d'autres formes de stockage et d'approvisionnement en eau d'une importance capitale partout dans le monde. La durabilité de l'eau n'est pas possible sans une durabilité du climat, qui elle-même implique une durabilité énergétique. Les humains sont face à un vaste et unique système où tout est lié.

Les forêts

> *On note une tendance mondiale très claire à la perte massive de zones forestières… Actuellement, la perte de zones forestières et de forêts primaires résiduelles, et la réduction progressive de la qualité interne des peuplements forestiers résiduels s'accélèrent… Une grande partie des zones boisées qui restent sont progressivement appauvries, et c'est tout le système qui est menacé.*
>
> – Commission mondiale pour les forêts et le développement durable, 1999

Une forêt est une ressource en soi qui possède des fonctions vitales inestimables sur le plan économique. Les forêts modèrent le climat, contrôlent les inondations et emmagasinent de l'eau pour lutter contre la sécheresse. Elles atténuent l'effet érosif des pluies, participent à la formation des sols le long des pentes et les empêchent de s'effondrer, et préservent les cours d'eau, les zones littorales, les canaux d'irrigation et les réservoirs des barrages de l'envasement. Elles abritent et entretiennent de nombreuses espèces vivantes. On estime ainsi que les forêts tropicales, qui ne couvrent pourtant que 7 % du globe, abritent à elles seules au moins la moitié des espèces. Un grand nombre de ces espèces, des palmiers aux champignons en passant par les plantes médicinales, des espèces utilisées pour des teintures aux espèces comestibles, ont une valeur commerciale et n'existeraient pas sans les arbres protecteurs qui constituent leur habitat.

Les forêts absorbent et retiennent une grande quantité de dioxyde de carbone, ce qui contribue à réguler les stocks de CO_2 dans l'atmosphère et à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique. Enfin, mais c'est loin d'être négligeable, les forêts en bonne santé sont de beaux endroits, très appréciés pour se détendre et faire le plein de sérénité.

Avant l'avènement de l'agriculture, on comptait entre 6 et 7 milliards d'hectares de forêts sur la Terre. Il n'y en a plus aujourd'hui que 3,9 milliards si l'on prend en compte les 0,2 milliard d'hectares de plantations forestières. Plus de la moitié des pertes de forêts naturelles dans le monde se sont produites depuis 1950. Entre 1990 et 2000, la surface de forêts naturelles a diminué de 160 millions d'hectares, soit d'environ 4 %[41], et les pertes se

41. Les chiffres diffèrent énormément selon les auteurs quant à la surface de forêts dans le monde. C'est dû à la fois au fait qu'il existe différentes définitions pour le terme « forêt » et au fait que le principal fournisseur de données, la FAO, a opté pour de nouvelles définitions dans son évaluation de l'an 2000. Dans cette partie, nous rapportons les nouveaux chiffres de la FAO que nous avons pris dans *Évaluation des ressources forestières mondiales* (FRA), Rome, FAO, 2000, <www.fao.org/forestry/fr/>.

sont principalement déroulées dans les tropiques ; la destruction des forêts tempérées s'est en effet produite bien avant 1900, lors de l'industrialisation de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

La perte de forêts est un signe évident de non-durabilité, car c'est le stock d'une ressource renouvelable qui s'amenuise. Mais, comme c'est souvent le cas, derrière la tendance mondiale sans équivoque se cachent des situations complexes et variées au niveau local.

Il faut bien faire la distinction entre les deux manières de mesurer la ressource forestière : en termes de surface ou en termes de qualité. Il n'y a en effet rien de commun entre un hectare de forêt intacte composée d'arbres vieux de plusieurs centaines d'années et une coupe rase qui repousse, mais qui ne comportera pas un seul arbre ayant une valeur économique avant 50 ans et qui ne présentera peut-être jamais plus la diversité écologique d'une forêt primaire. Et pourtant, de nombreux pays ne distinguent pas les deux quand ils établissent leurs données.

La qualité d'une forêt est bien plus difficile à mesurer que sa surface. Les données qui sont les moins sujettes à controverse en matière de qualité ont en fait trait à la surface : ce sont les statistiques portant sur les surfaces résiduelles de forêts qui n'ont jamais été coupées (appelées forêts primaires, vierges ou originelles). Et il est évident que ces forêts, très précieuses, sont actuellement converties à un rythme soutenu en forêts moins précieuses.

Un cinquième seulement (1,3 milliard d'hectares) du couvert forestier originel de la Terre se présente aujourd'hui encore sous forme de vastes étendues de forêts naturelles relativement intactes[42]. La moitié est constituée des forêts boréales de Russie, du Canada et de l'Alaska ; le reste est en grande partie représenté par la forêt tropicale humide d'Amazonie. D'immenses étendues sont menacées par l'exploitation forestière et minière, les déboisements

42. Dirk Bryant, Daniel Nielsen et Laura Tangley, *The Last Frontier Forests : Ecosystems and Economies on the Edge*, Washington, DC, World Resources Institute, 1997.

pour l'agriculture et d'autres activités anthropiques. Une surface de 0,3 milliard d'hectares seulement bénéficie officiellement d'une protection (et encore, cette protection se limite parfois à la signature d'un simple papier ; dans nombre de ces forêts, le bois et/ou les animaux sauvages sont systématiquement exploités sans autorisation légale).

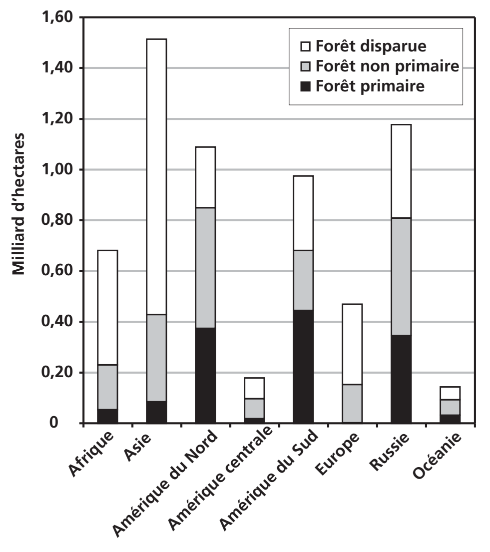
Les États-Unis (hormis l'Alaska) ont perdu 95 % de leur couvert forestier originel. L'Europe n'a pour ainsi dire plus de forêts primaires. La Chine a perdu les trois quarts de ses forêts et quasiment toutes ses forêts primaires (voir figure 3-7). La surface de forêts des zones tempérées qui ont été exploitées mais qui ont repoussé (forêts secondaires) augmente légèrement, mais beaucoup enregistrent une baisse des nutriments du sol, des mélanges d'essences, de la taille des arbres, de la qualité du bois et de leur taux de croissance ; elles ne sont pas gérées durablement.

Moins de la moitié des forêts naturelles résiduelles se situent dans les zones tempérées (1,6 milliard d'hectares) ; le reste se trouve en zone tropicale (2,1 milliards d'hectares). Entre 1990 et 2000, la surface de forêts naturelles en zone tempérée n'a que légèrement baissé, de quelque 9 millions d'hectares, ce qui revient à une perte d'environ 0,6 % en dix ans. La moitié de ces forêts naturelles a été convertie en plantations forestières intensives pour l'industrie du papier et celle du bois. La même superficie ou presque a été reboisée.

Si la superficie des forêts des zones tempérées demeure relativement stable, celle des forêts tropicales est en chute libre. En effet, selon la FAO, entre 1990 et 2000, plus de 150 millions d'hectares de forêts tropicales dans le monde ont été convertis à d'autres fins, soit une superficie équivalente à celle du Mexique. La perte de forêt dans les années 1990 pourrait donc avoir été de 15 millions d'hectares par an, soit de 7 % durant la décennie.

Il s'agit là des données officielles, mais personne ne sait avec précision à quelle vitesse la forêt tropicale disparaît. Les chiffres changent d'une année sur l'autre et sont controversés. Et le fait que le taux de perte de cette ressource ne puisse être clairement

FIGURE 3-7 – Ce qu'il reste de forêts primaires



Seule une petite fraction du couvert forestier originel de la planète était encore en place en 1997 sous la forme de forêts primaires intactes. **(Source : WRI)**

déterminé constitue l'une des raisons structurelles du dépassement des limites dans ce secteur.

Menée par la FAO en 1980, la première évaluation à faire autorité en matière de taux de déforestation en zone tropicale a conclu à une perte de 11,4 millions d'hectares par an. Au milieu des années 1980, ce chiffre a atteint plus de 20 millions d'hectares par an. Puis, suite à des changements de politique, notamment au Brésil, il est redescendu en 1990 aux alentours de 14 millions d'hectares par an. En 1999, une nouvelle évaluation de la FAO établissait le taux annuel de perte de forêt à 11,3 millions d'hectares par an, l'intégralité ou presque de ces pertes survenant en zone tropicale. Enfin, comme nous l'avons vu plus haut, à la fin de la décennie, une dernière estimation indiquait que 15,2 millions d'hectares disparaissaient chaque année.

Ces chiffres ne prennent en compte que la conversion permanente des forêts en vue d'autres usages (en premier lieu pour l'agriculture et l'élevage et en second lieu pour la construction de routes et d'habitations). *Ils ne tiennent pas compte de l'exploitation du bois* (étant donné qu'une forêt exploitée est tout de même comptabilisée comme une forêt). Et ils ne tiennent pas compte non plus des feux de forêt qui ont ravagé 2 millions d'hectares au Brésil et en Indonésie et 1,5 million au Mexique et en Amérique centrale en 1997-98. (Une forêt brûlée est elle aussi comptabilisée comme une forêt.) Si on ajoute à cela le taux net auquel les zones estampillées « forêt tropicale » perdent leurs arbres, on arrive à un total qui dépasse presque à coup sûr les 15 millions d'hectares par an et pourrait avoisiner 1 % des zones boisées chaque année.

Malgré l'incertitude des données, nous pouvons nous servir de chiffres approximatifs pour nous faire une idée du sort qui attend vraisemblablement les forêts tropicales si le système actuel ne change pas. La figure 3-8 s'appuie sur l'estimation de la surface totale de forêt tropicale en l'an 2000, soit 2,1 milliards d'hectares. Nous partons de l'hypothèse que le taux de perte actuel s'élève à 20 millions d'hectares par an, ce qui est plus que l'estimation officielle de la FAO, mais ce qui permet d'intégrer les feux de forêt, l'exploitation non durable et les sous-estimations. La ligne horizontale en pointillés représente la limite de la perte de forêt si 10 % des forêts tropicales actuelles continuent à être protégés. (C'est à peu près le pourcentage de forêt tropicale qui bénéficie aujourd'hui d'une certaine forme de protection[43].)

Si le taux de destruction reste le même avec 20 millions d'hectares par an, la forêt primaire non protégée aura disparu dans

43. Cette estimation est tirée du World Conservation Monitoring Center du PNUE au Royaume-Uni (<www.unep-wcmc.org/>) et des catégories I-VI d'aires protégées de l'UICN, et constitue une moyenne mondiale. La fraction protégée est à peu près la même pour les forêts tempérées et boréales (situées au nord) que pour les forêts tropicales (au sud). Si l'on mesure par rapport au couvert forestier originel, c'est-à-dire à la superficie forestière avant la déforestation par l'homme, il faut diviser ce pourcentage par deux.

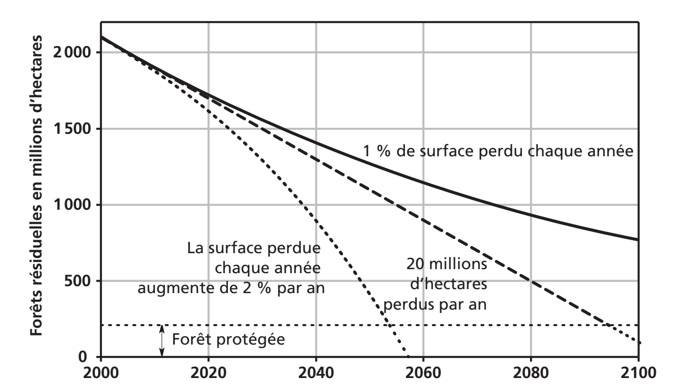
95 ans. Ce scénario est représenté par la courbe du milieu sur la figure 3-8. Elle est le reflet d'une situation où les forces qui sont responsables de la destruction des forêts ne vont ni se renforcer ni s'affaiblir au cours du siècle à venir.

Si le taux de destruction croît de façon exponentielle, disons à la vitesse à laquelle les populations des pays tropicaux augmentent (d'environ 2 % par an), la forêt non protégée aura entièrement disparu dans environ 50 ans. Cette courbe est le reflet d'une situation dans laquelle l'association entre croissance démographique et développement de l'industrie forestière va entraîner l'augmentation exponentielle de la perte de forêt.

Si le taux de destruction se maintient à un pourcentage constant (disons que 1 % de forêt disparaît tous les ans), la perte sera chaque année un peu moindre que l'année précédente parce qu'il restera chaque année moins de forêt. À ce rythme-là, la moitié de la forêt tropicale aura disparu au bout de 72 ans. Cette courbe traduit une situation où chaque perte de forêt rend la perte suivante moins probable, ce qui peut s'expliquer par le fait que les forêts les plus accessibles et ayant le plus de valeur ont été coupées en premier.

En fait, l'avenir nous réserve vraisemblablement un mélange de ces trois scénarios. À mesure que les croissances démographique et économique vont accroître la demande de produits forestiers, ce qui nécessitera d'abattre plus d'arbres, l'inaccessibilité croissante des forêts et la baisse de leur qualité vont rendre leur exploitation plus coûteuse. Dans le même temps, les pressions environnementales et politiques vont sans doute jouer en faveur d'une meilleure protection des forêts résiduelles et déplacer la production de bois vers les plantations à haut rendement. Quelle que soit l'issue de ces tendances contraires, une conclusion semble incontournable : le flux actuel de produits issus de forêts tropicales primaires, c'est-à-dire de forêts qui ont été plantées et entretenues par la nature, qui n'ont strictement rien coûté à l'économie humaine et qui sont suffisamment anciennes pour que des arbres d'une grande taille et d'une grande valeur y poussent, n'est pas soutenable.

FIGURE 3-8 – Exemples de scénarios de déforestation tropicale



Les estimations quant à la disparition future des forêts tropicales dépendent des hypothèses sur les tendances démographiques, réglementaires et économiques à venir. Ce graphique présente trois scénarios. Si la perte de 20 millions d'hectares par an, caractéristique des années 1990, continue à augmenter de 2 % par an, la forêt non protégée aura disparu en 2054. Si la surface reste constante avec 20 millions d'hectares par an, la forêt non protégée aura disparu vers 2094. Enfin, si le taux de perte correspond chaque année à 1% de la surface de forêt non protégée résiduelle, la forêt diminuera de moitié tous les 72 ans.

Les sols, les climats et les écosystèmes tropicaux sont très différents de leurs homologues des régions tempérées. Plus riches en espèces, les forêts tropicales poussent plus vite, mais sont aussi plus vulnérables. Il n'est pas certain qu'elles puissent survivre ne serait-ce qu'à une coupe rase ou à un feu sans que le sol et l'écosystème ne soient très dégradés. Et si des expériences sont actuellement en cours pour trouver une méthode d'exploitation des forêts tropicales sélective ou par bandes afin de leur permettre de se régénérer, la plupart des pratiques actuelles nous conduisent à considérer ce type de forêt, et tout particulièrement ses essences les plus précieuses, comme une ressource non renouvelable[44].

44. Voir Nels Johnson et Bruce Cabarle, « Surviving the Cut : Natural Forest Management in the Humid Tropics », Washington, DC, World Resources Institute, 1993.

Les raisons de l'exploitation de la forêt tropicale varient d'un pays à l'autre. Parmi les facteurs, on compte les multinationales du bois et du papier qui cherchent à accroître leurs ventes ; les États qui augmentent leurs exportations pour rembourser leur dette extérieure ; les éleveurs et les agriculteurs qui convertissent la forêt en pâturages ou en cultures ; les populations sans terres qui ont un besoin impérieux de bois de chauffage ou d'un lopin de terre pour faire pousser de quoi se nourrir. Tous ces acteurs œuvrent souvent de concert, les États faisant venir les multinationales, les multinationales exploitant les forêts et les pauvres se déplaçant le long des chemins forestiers pour trouver un endroit où s'établir.

Mais il existe un autre facteur d'exploitation non durable des forêts dans les zones tropicales comme tempérées. Dans un monde où le bois de bonne qualité est en train de disparaître, un arbre issu d'un vieux peuplement peut valoir 10 000 dollars voire plus. Voilà de quoi attiser les convoitises. D'où les cessions de ressources forestières publiques au secteur privé, les ventes secrètes de permis d'exploiter, la manipulation des chiffres, les faux certificats d'essences, de volumes ou de surfaces coupés, les vérifications trop rapides du respect de la réglementation, les accords de complaisance et les dessous-de-table. Et de telles pratiques ne sont pas l'apanage des pays tropicaux.

> *La Commission s'est aperçue que le problème principal du secteur forestier, celui qui prévaut le plus et qui est le plus flagrant, mais aussi celui qui est le moins abordé… est celui de la corruption*[45].

Même dans les pays les plus soucieux de leurs forêts, ces dernières reculent, sans que l'on sache exactement à quel rythme. Dans l'édition de 1992, nous avions fait figurer des cartes de la perte de forêt dans un petit pays, le Costa Rica. Souhaitant actualiser ces données, nous avons contacté le Centre de recherche sur

45. Commission mondiale pour les forêts et le développement durable (CMFDD), *Nos forêts… Notre avenir*, 1999.

le développement durable de l'Université du Costa Rica… pour nous entendre dire que les données des années précédentes avaient dû être révisées suite à la mise au point de meilleures techniques de mesure.

En outre, la demande de produits forestiers augmente, ce qui ne fait qu'aggraver le problème du recul des forêts. Entre 1950 et 1996, la consommation mondiale de papier a été multipliée par 6 et la FAO pense qu'elle va passer de 280 à 400 millions de tonnes d'ici 2010[46]. Aux États-Unis, un habitant consomme en moyenne 330 kg de papier par an. Dans les autres pays industrialisés, cette moyenne s'élève à 160 kg, et dans les pays en développement à 17 kg seulement. Bien que le recyclage du papier soit en progression, l'utilisation de bois vierge pour la pâte à papier continue à augmenter de 1 à 2 % par an.

La consommation totale de bois, tous usages confondus – bois de construction, produits papier et bois-énergie –, augmente, même si le taux d'augmentation ralentit (figure 3-9). Une des raisons de ce ralentissement dans les années 1990 semble être la récession des économies asiatiques et russe. La stagnation de la consommation de bois rond ne pourrait donc être qu'un phénomène passager. Si chaque habitant de la planète consommait autant de bois que le fait en moyenne un habitant d'un pays industrialisé, la consommation totale de bois ferait plus que doubler[47].

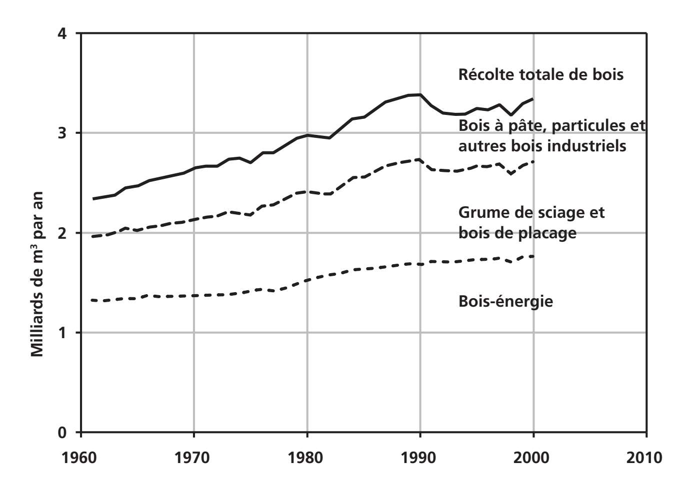
Cependant, on note également une tendance à la réduction de la demande de bois, par exemple grâce au recyclage et à l'utilisation plus efficiente des produits forestiers. Si cette tendance s'accentuait, la planète pourrait sans problème satisfaire ses besoins en bois à partir d'un flux bien plus restreint de matière première. Voici quelques points sur lesquels mettre l'accent :

---

46. FAO, *Provisional Outlook for Global Forest Products Consumption, Production, and Trade to 2010*, Rome, FAO, 1997.

47. Janet N. Abramovitz et Ashley T. Mattoon, « Reorienting the Forest Products Economy », *in* Lester R. Brown *et al.*, *State of the World 1999*, *op cit.*

FIGURE 3-9 – Consommation mondiale de bois



La consommation de bois continue à augmenter, mais plus lentement. Environ la moitié du bois retiré des forêts dans le monde est utilisé comme combustible. **(Source : FAO)**

- *Le recyclage du papier.* Environ 50 % du papier fabriqué aux États-Unis est du papier recyclé ; au Japon, c'est plus de la moitié et aux Pays-Bas, 96 %. À travers le monde, ce sont 41 % du papier et du carton qui sont recyclés[48]. Si le reste de la planète imitait les Pays-Bas, le taux de papier recyclé pourrait plus que doubler.
- *L'efficience des scieries.* Les scieries modernes transforment 40 à 50 % du produit brut en bois vendable (et les résidus en combustible, papier ou bois composite constitué de copeaux agglutinés). Les scieries moins efficientes, notamment dans les pays en développement, ne transforment que 25 à 30 % du bois. Si elles pouvaient être modernisées, elles obtiendraient deux fois plus de bois par arbre abattu[49].

---

48. Lester R. Brown *et al.*, *State of the World 1999*, *op. cit.*

49. Janet N. Abramovitz et Ashley T. Mattoon, « Reorienting the Forest Products Economy », *in ibid.*

- *L'efficience du combustible.* Plus de la moitié du bois coupé dans les forêts est utilisé comme combustible pour la nourriture, le chauffage et de petites industries (fabrication de briques, brassage, séchage du tabac) par les populations pauvres, à l'aide le plus souvent de fours à bois ou de foyers ouverts extrêmement inefficients. En améliorant l'efficience des fours ou en utilisant d'autres combustibles, il serait possible de satisfaire les besoins des humains tout en consommant beaucoup moins de bois, en polluant moins, et en se procurant le combustible plus facilement.
- *L'utilisation efficiente du papier.* La moitié du papier et du carton dans le monde sert aux emballages et à la publicité. Un ménage étatsunien reçoit chaque année en moyenne 550 publicités inopportunes dans sa boîte aux lettres, dont la plupart sont jetées sans même avoir été lues. Même si nous sommes à l'âge de l'électronique, ou peut-être de ce fait même, la consommation de papier par habitant a doublé aux États-Unis entre 1965 et 1995. On pourrait supprimer les publicités inopportunes et les excès d'emballages, de même que l'on pourrait perfectionner les imprimantes laser et les fax qui n'impriment que d'un côté, ainsi que bien d'autres technologies qui sont sources de gaspillage.
- *Une tarification juste.* Il faudrait supprimer les subventions gouvernementales directes et indirectes à l'industrie du bois, et des taxes reflétant la valeur perdue suite à l'abattage d'un arbre devraient être imposées ; ainsi, le prix des produits forestiers serait une indication plus juste de leur véritable coût.

Ce genre d'avancées dans les pays industrialisés permettrait sans doute de réduire de moitié au moins les quantités de bois prélevées sur la forêt et, par là même, le flux de déchets en bout de chaîne, et ce, sans réduire ou presque notre qualité de vie.

Parallèlement à cela, nous pourrions exploiter les fibres de valeur issues de la forêt en provoquant bien moins de dégâts. Les coupes rases, en particulier celles qui sont pratiquées sur les

pentes abruptes, pourraient être remplacées par des coupes sélectives ou des coupes par bandes. Les bandes-tampons le long des cours d'eau permettraient de freiner l'érosion et protégeraient les écosystèmes aquatiques d'un trop grand rayonnement solaire. Certains arbres morts, encore debout ou tombés, pourraient être laissés sur place pour servir d'habitat.

On note qu'un mouvement se développe en faveur de la « certification verte » qui permet aux consommateurs de savoir quels produits forestiers sont issus d'une exploitation et d'une gestion raisonnées des forêts. Fin 2002, le Forest Stewardship Council (FSC) avait certifié au total 30 millions d'hectares de forêt comme étant « gérés de façon durable », un chiffre modeste mais qui augmente rapidement et qui témoigne du pouvoir du marché, en l'occurrence celui des consommateurs qui réclament du bois certifié.

Les plantations forestières à haut rendement pourraient être étendues sur des terres déjà défrichées ou marginales. Elles produisent une quantité étonnante de bois à l'hectare, ce qui réduit la pression que l'exploitation exerce sur les forêts naturelles.

Prenons à cet égard l'exemple extrême des plantations forestières tropicales à très haut rendement qui peuvent donner (pendant un certain temps du moins) jusqu'à 100 m^3 de bois par hectare et par an. C'est 40 fois plus que le taux de croissance moyen des forêts naturelles des zones tempérées qui produisent environ 2,5 m^3 de bois par hectare et par an. Sur la base du rendement le plus élevé, il ne faudrait que 34 millions d'hectares (une surface semblable à celle de la Malaisie) pour satisfaire la demande mondiale actuelle en pâte vierge, en bois de construction et en bois-énergie. Et si la productivité n'était que de 50 m^3 par hectare et par an, il faudrait 68 millions d'hectares (soit la superficie de la Somalie) pour répondre à la demande mondiale. Pour que cette extraordinaire productivité des plantations tropicales soit durable, il faudrait sans doute introduire une gestion plus « biologique » des plantations forestières : mélange et rotation des espèces, et utilisation de méthodes de fertilisation et de

contrôle phytosanitaire plus naturelles et moins nocives pour l'environnement.

Il existe de nombreuses mesures à prendre pour ramener le taux d'exploitation des forêts en dessous des limites soutenables et aucune d'elles n'est impossible. Elles sont toutes en vigueur quelque part dans le monde, mais jamais dans le monde entier. Voilà pourquoi les forêts continuent à régresser.

> *Bien que, depuis quelques années, le grand public prenne de plus en plus conscience de l'impact de la déforestation mondiale, celle-ci n'a pas ralenti de façon notable*[50].

Espèces et services écosystémiques

> *L'indice Planète vivante est un indicateur de l'état des écosystèmes naturels de la planète. Il dénombre la quantité de forêts, d'eau douce et d'espèces marines. Cet indice montre un déclin général d'environ 37 % entre 1970 et 2000.*
>
> – WWF, 2002

Il va de soi que les sols, l'eau et la terre sont des sources dont dépend l'humain puisqu'elles lui fournissent les flux nécessaires à son existence et à son économie. Il existe cependant un autre type de sources, au moins aussi importantes mais beaucoup moins visibles, car l'économie humaine ne leur a jamais attribué de valeur monétaire : il s'agit des espèces naturelles, à la fois non commerciales et non commercialisables, des écosystèmes qu'elles forment et des contributions qu'elles apportent en capturant, en mobilisant et en recyclant l'énergie et la matière indispensables à toute vie.

On parle de plus en plus de *services écosystémiques* pour qualifier l'apport quotidien et inestimable de ces sources biotiques. En voici quelques-uns :

---

50. World Resources Institute, *World Resources 1998-99*, *op. cit.*

- Purification de l’air et de l’eau.
- Absorption et stockage de l’eau ; atténuation des sécheresses et des inondations.
- Décomposition, décontamination et séquestration des déchets.
- Régénération des nutriments du sol ; constitution de la structure du sol.
- Pollinisation.
- Contrôle des nuisibles.
- Dissémination des graines et des nutriments.
- Modération des phénomènes extrêmes en matière de vent et de températures ; stabilisation partielle du climat.
- Fourniture d’une grande variété de produits agricoles, médicinaux et industriels.
- Développement et entretien du pool génétique et de la biodiversité qui rendent possibles tous les services ci-dessus.
- Facultés à mettre en place des stratégies de survie, de résilience, d’évolution et de diversification qui font leurs preuves depuis 3 milliards d’années.
- Source d’inspiration esthétique, spirituelle et intellectuelle sans égale[51].

Bien que la valeur de ces services ne soit pas mesurable, certains ont néanmoins essayé de l’évaluer et toutes les tentatives pour donner une valeur monétaire à ces services naturels ont abouti à une estimation de plusieurs milliers de milliards par an, ce qui dépasse de loin la valeur monétaire de la production annuelle de l’économie humaine[52].

L’estimation du WWF citée ci-dessus signifie que la planète a perdu une part importante de ses services écosystémiques au cours des 30 dernières années. Mais cela reste très difficile à prouver sur le plan quantitatif. La méthode la plus répandue, bien

51. Cette liste s’inspire de Gretchen C. Daily (dir.), *Nature’s Services : Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington, DC, Island Press, 1997.

52. Voir Robert Costanza *et al.*, « The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital », *Nature*, vol. 387, nº 6630, 15 mai 1997. Costanza et ses collègues ont estimé (faisant preuve de prudence) la valeur des services naturels à 33 000 milliards de dollars par an à une époque où le PNB mondial s’élevait à 18 000 milliards de dollars par an.

que peu significative, consiste à tenter de compter le nombre d'espèces et à mesurer leur taux d'extinction. Mais, aussi surprenant que cela puisse paraître, c'est impossible à faire, car les chercheurs ne connaissent le nombre d'espèces qu'à un facteur 10 près : ils estiment ainsi qu'il y en aurait entre 3 et 30 millions[53]. Seules 1,5 million d'entre elles ont été dénommées et répertoriées. Il s'agit le plus souvent des espèces les plus importantes en taille et les plus facilement repérables : plantes vertes, mammifères, oiseaux, poissons et reptiles. La science est beaucoup moins au fait des myriades d'espèces d'insectes et encore moins des microbes.

Étant donné que personne ne sait combien il existe d'espèces, personne non plus ne peut savoir avec précision combien d'entre elles disparaissent. Mais il ne fait aucun doute que leur nombre diminue rapidement. La plupart des biologistes n'hésitent pas à affirmer qu'une « extinction de masse » est en cours[54]. Et les écologistes soutiennent qu'il n'y a pas eu pareille vague d'extinction depuis celle de la fin du Crétacé qui a entraîné la disparition des dinosaures, il y a 65 millions d'années.

Ils tirent ces conclusions en observant avant tout la vitesse à laquelle les habitats disparaissent. Ainsi :

- Madagascar est une véritable île au trésor sur le plan du vivant : les forêts de la côte est abritent 12 000 espèces de plantes et 190 000 espèces d'animaux connues, dont au moins 60 % n'existent nulle part ailleurs sur Terre. Or plus de 90 % de ces forêts ont disparu, pour les besoins de l'agriculture essentiellement.
- L'ouest de l'Équateur abritait autrefois entre 8 000 et 10 000 espèces de plantes dont la moitié environ étaient endémiques. Chaque espèce de plante permet à 10 à 30 espèces animales de vivre. Mais depuis 1960, toutes les forêts ou presque de l'ouest du pays ont laissé la place à des bananeraies, des puits de pétrole et des habitations humaines.

---

53. Robert M. May, « How Many Species Inhabit the Earth ? », *Scientific American*, octobre 1992.

54. Joby Warrick, « Mass Extinction Underway, Majority of Biologists Say », *Washington Post*, 21 avril 1998.

Comme on pouvait s'y attendre, on enregistre la plupart des extinctions là où il y a le plus d'espèces. Il s'agit essentiellement des forêts tropicales, des récifs coralliens et des zones humides. Au moins 30 % des récifs coralliens dans le monde sont dans un état critique et 95 % de ceux qui ont été passés en revue en 1997 étaient dégradés et subissaient une perte d'espèces[55]. Les zones humides sont dans une situation plus critique encore. Ce sont des lieux qui enregistrent une intense activité biologique et où viennent frayer de nombreuses espèces de poissons. Seuls 6 % de la surface du globe sont (ou étaient) constitués de zones humides. La moitié de ces dernières ont disparu suite à des dragages, remblaiements, drainages et creusements de fossés. Et encore, tout cela ne prend pas en compte les zones dégradées par la pollution.

Pour estimer les taux d'extinction mondiaux, on commence par effectuer des mesures assez précises de la perte d'habitat. Puis, on évalue combien d'espèces auraient pu vivre dans cet habitat disparu ; il s'agit d'une évaluation qui, par définition, est imprécise. Puis, on établit une relation entre la perte d'habitat et la perte d'espèces. En règle générale, 50 % des espèces perdurent même si 90 % de leur habitat disparaît.

Ces calculs donnent lieu à des débats sans fin[56]. Mais, à l'instar des autres chiffres auxquels nous sommes confrontés dans ce chapitre, ils donnent une idée générale claire. Parmi tous les grands animaux qui sont relativement bien étudiés, les chercheurs estiment aujourd'hui que 24 % des 4 700 espèces de mammifères, 30 % des 25 000 espèces de poissons et 12 % des 10 000 espèces ou presque d'oiseaux que compte la planète sont menacées d'extinction[57]. Et il en va de même pour 34 000 des 270 000 espèces de

55. Don Hinrichson, « Coral Reefs in Crisis », *Bioscience*, octobre 1997.

56. Voir, par exemple, Charles C. Mann, « Extinction : Are Ecologists Crying Wolf ? », *Science*, vol. 253, nº 5021, 16 août 1991, ainsi que d'autres articles sur le même sujet qui témoignent de l'extrême inquiétude des écologistes.

57. Commission de la sauvegarde des espèces (CSE), *Liste rouge 2000 des espèces menacées de l'UICN*, Gland, Suisse, Union internationale pour la

plantes connues[58]. Les taux d'extinction seraient aujourd'hui mille fois supérieurs à ce qu'ils auraient été sans l'impact de l'humain.

La perte d'espèces n'est pas un moyen satisfaisant de mesurer la durabilité de la biosphère, car personne ne sait où se situent les limites. Combien d'espèces et lesquelles peuvent disparaître d'un écosystème avant que le système dans son entier ne s'effondre ? On compare parfois ce phénomène avec le fait de voyager dans un avion auquel on retire les rivets un par un. Combien faudra-t-il en retirer pour que l'avion ne puisse plus voler ? L'avantage avec un avion, c'est que les rivets sont indépendants les uns des autres. Pas les espèces d'un écosystème. Si l'une d'elles disparaît, elle peut en entraîner d'autres dans une longue réaction en chaîne.

Étant donné la difficulté qu'il y a à mesurer la vitesse à laquelle baisse le nombre d'espèces sur la planète, le WWF a opté pour une méthode différente afin de quantifier le déclin de la richesse biologique : *l'Indice « Planète Vivante »*. Plutôt que de mesurer la baisse du nombre d'espèces, le WWF suit la taille de la population d'un grand nombre d'espèces différentes. Il fait ensuite la moyenne de ces mesures afin d'obtenir une estimation quantitative du changement survenu avec le temps au sein de la population d'une espèce « représentative ». C'est cette méthode qui lui a permis de conclure que la population des espèces « moyennes » a diminué de plus d'un tiers depuis 1970[59]. En d'autres termes, le nombre d'animaux, de plantes et de poissons accuse une forte baisse. Il est donc évident que nous puisons de façon non durable dans la source des services écosystémiques. Cette conclusion a été soulignée avec force en 1992 dans un appel intitulé « World Scientists' Warning to Humanity » et rédigé par 1 700 chercheurs

---

conservation de la nature, 2000, telle que citée dans Lester R. Brown, « Water Deficits », *op. cit.*

58. Constance Holden, « Red Alert for Plants », *Science*, vol. 280, nº 5362, 17 avril 1998.

59. WWF, *Rapport « Planète Vivante » 2002*, Gland, Suisse, WWF, 2002.

de renommée internationale, dont la majeure partie des prix Nobel en sciences :

> *L'altération à grande échelle que nous provoquons dans le grand tissage du vivant, altération à laquelle s'ajoutent les dégâts sur l'environnement infligés par la déforestation, la perte des espèces et le changement climatique, pourraient provoquer des effets désastreux parmi lesquels l'effondrement soudain de systèmes biologiques vitaux dont nous ne comprenons qu'imparfaitement les interactions et la dynamique. L'incertitude quant à l'ampleur de ces effets ne saurait justifier aucune complaisance ni aucun atermoiement dans les mesures à prendre pour contrer ces menaces.*

Sources non renouvelables

Les combustibles fossiles

> *Notre analyse de la découverte et de l'exploitation des gisements pétrolifères dans le monde nous permet d'estimer qu'au cours de la prochaine décennie, l'offre de pétrole conventionnel ne pourra répondre à la demande… La découverte de réserves de pétrole à travers la planète a connu un pic au début des années 1960 et baisse régulièrement depuis… Il y a une quantité limitée de pétrole brut dans le monde et nous en avons déjà découvert 90 %.*
>
> – Colin J. Campbell et Jean H. Laherrère, 1998

> *On se soucie peu actuellement, sur le court terme, des réserves de pétrole… La planète ne renferme pourtant qu'une quantité finie de cette matière première et la production mondiale va inévitablement connaître un pic, puis baisser… Selon les estimations classiques, ce pic ne devrait pas intervenir avant une dizaine à une vingtaine d'années, c'est-à-dire entre 2010 et 2025.*
>
> – World Resources Institute, 1997

Certes, on note un écart de quelques décennies entre optimistes et pessimistes concernant le pic de production du pétrole, mais de l'avis général, cette ressource est la plus limitée des principaux combustibles fossiles et sa production mondiale atteindra son maximum à un moment ou à un autre de la première moitié du

XXIe siècle. L'utilisation annuelle d'énergie exigée par l'économie humaine a augmenté en moyenne de 3,5 % par an entre 1950 et 2000. La consommation énergétique mondiale s'est accrue de façon inégale mais inexorable, traversant les guerres, les récessions, les instabilités monétaires et les évolutions techniques (figure 3-10). La majeure partie de cette énergie est consommée par les pays industrialisés. Un habitant d'Europe de l'Ouest utilise en effet 5,5 fois plus d'énergie commerciale[60] en moyenne qu'un Africain, et un Nord-Américain, en moyenne neuf fois plus qu'un Indien[61]. Mais il s'agit de l'énergie commerciale, dont de nombreux individus sont contraints de se passer.

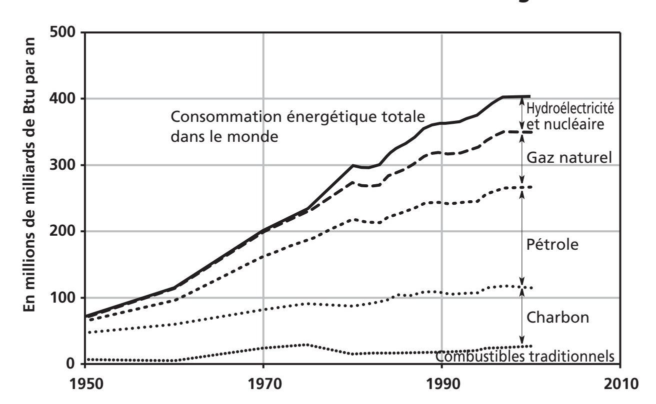
> *Plus d'un quart de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité et deux cinquièmes des individus continuent à recourir principalement à la biomasse pour leurs besoins énergétiques de base. Et même si le nombre de personnes dépourvues d'approvisionnement énergétique va baisser au cours des prochaines décennies, on estime que 1,4 milliard d'habitants n'auront toujours pas d'électricité en 2030. Le nombre d'individus ayant recours au bois, aux résidus de récoltes et aux déjections animales comme combustible pour cuisiner et se chauffer va en réalité augmenter*[62].

60. Le terme *énergie commerciale* fait référence à l'énergie vendue sur les marchés ; il ne prend pas en compte l'énergie consommée par les populations qui ramassent du bois, du fumier ou d'autres types de biomasse pour leur usage personnel. Les *sources d'énergie non commerciales* sont essentiellement renouvelables, mais cela ne veut pas dire qu'elles sont exploitées de façon durable. On estime qu'elles représentent environ 7 % de la consommation totale d'énergie. WRI, *World Resources 1998-99*, *op. cit.*

61. U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2003*, table A1, « World Total Energy Consumption by Region, Reference Case, 1990-2025 (Quadrillion BTU) », <www.eia.gov/oiaf/ieo/>.

62. Agence internationale de l'énergie (AIE), *World Energy Outlook 2002*, Vienne, AIE, 2002, <www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2002_part1.pdf> et <www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2002_part2.pdf>. On trouvera des scénarios à plus long terme sur le site du Conseil mondial de l'énergie, « Global Energy Scenarios to 2050 and Beyond », 1999, <www.worldenergy.org>.

FIGURE 3-10 – Consommation mondiale d'énergie



La consommation mondiale d'énergie a doublé à trois reprises entre 1950 et 2000. Les combustibles fossiles continuent à être les principales sources d'approvisionnement en énergies primaires : la part du charbon a atteint un pic vers 1920, époque à laquelle il représentait plus de 70 % des combustibles consommés ; la part du pétrole a, elle, connu un pic au début des années 1980 avec un peu plus de 40 %. **(Sources : Nations Unies ; Département américain de l'Énergie)**

La plupart des experts en analyse énergétique estiment que la consommation devrait continuer à augmenter. Selon le scénario « de référence » présenté par l'Agence internationale de l'énergie dans son *World Energy Outlook 2002*, cité ci-dessus, la consommation mondiale d'énergie primaire devrait croître de 66 % entre 2000 et 2030. Et même le scénario « alternatif » (plus écologique) indique une augmentation de plus de 50 % de la consommation mondiale d'énergie sur cette même période. Une analyse plus détaillée, effectuée pour l'Agence danoise de l'énergie a, pour sa part, calculé que pour répondre aux besoins énergétiques de base des 9,3 milliards d'habitants que la planète pourrait bien compter en 2050, il faudrait six fois plus d'énergie livrée (énergie finale) qu'en 2000[63].

63. Bent Sørensen, « Long-Term Scenarios for Global Energy Demand and Supply », Energy & Environment Group, Roskilde University, janvier 1999.

La consommation d'énergie commerciale en l'an 2000 puisait à plus de 80 % dans les combustibles fossiles non renouvelables (pétrole, gaz naturel et charbon) dont les stocks souterrains baissent continuellement et inexorablement. Afin de déterminer si l'exploitation des « sources » du flux pose un problème de durabilité (nous aborderons les « exutoires » plus loin), nous devons savoir à quelle vitesse ces sources diminuent et si des substituts renouvelables sont mis au point assez vite pour compenser cette baisse.

Il règne dans ce domaine une grande confusion, y compris sur la diminution ou non de ces combustibles non renouvelables, parce que nous nous focalisons sur le mauvais signal. Le concept de *ressource* traduit la quantité totale de matière présente dans la croûte terrestre ; le concept de *réserve* traduit quant à lui la quantité de matière qui a été découverte ou dont on suppose la présence et qui peut être utilisée moyennant des hypothèses raisonnables en matière de technologie et de coût. Plus on utilise de ressources, plus elles baissent, mais il peut arriver que les chiffres concernant les réserves augmentent, parce qu'on découvre de nouveaux gisements, parce que les prix grimpent ou parce que la technologie fait des progrès. Or nous avons tendance à tirer des conclusions au sujet des ressources à partir d'observations portant sur les réserves.

Entre 1970 et 2000, l'économie mondiale a brûlé 700 milliards de barils de pétrole, 87 milliards de tonnes de charbon et 51 000 milliards de m^3 de gaz naturel. Durant ces 30 années, cependant, de nouveaux gisements de pétrole, de charbon et de gaz ont été découverts (et d'anciens ont été revus à la hausse). Résultat : le ratio entre les réserves connues et la production[64], c'est-à-dire le

64. Le terme *production* est impropre pour parler de l'opération qui consiste à extraire des combustibles fossiles du sol, car c'est la nature qui produit ces derniers sur des millions d'années. Les humains ne « produisent » donc pas de combustibles fossiles, ils les extraient, les exploitent, les pompent ou les puisent. Mais le terme production est celui qui est couramment utilisé comme dans l'expression *ratio réserves/production*, si bien que nous avons choisi de le reprendre.

nombre d'années connu durant lesquelles ces ressources exploitables seront disponibles si la production continue au rythme actuel, a augmenté, comme le montre le tableau 3-1.

Le ratio réserves/production a augmenté malgré une hausse importante de la consommation de gaz (de 130 % entre 1970 et 2000), de pétrole (d'environ 60 %) et de charbon (d'environ 145 %). Mais cette hausse signifie-t-elle que la terre renfermait plus de combustibles fossiles pour faire fonctionner l'économie des humains en 2000 qu'en 1970 ?

Non, bien évidemment. Après trois décennies d'exploitation, 700 milliards de barils de pétrole, 87 milliards de tonnes de charbon et 51 000 milliards de m^3 de gaz naturel ont été consommés. Les combustibles fossiles sont des ressources non renouvelables. Lorsqu'on les brûle, ils se transforment en dioxyde de

TABLEAU 3-1 – Production annuelle, ratios réserves/production (R/P) et durée de vie estimée des ressources de pétrole, gaz naturel et charbon

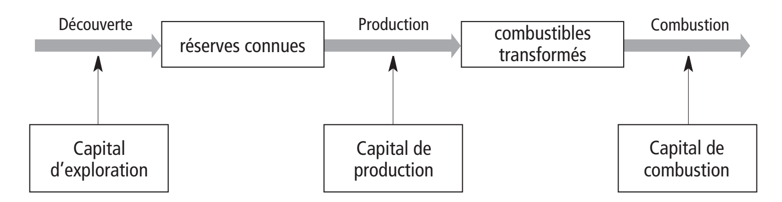
	Production en 1970 (par an)	R/P en 1970 (années)	Production en 2000 (par an)	R/P en 2000 (années)	Durée de vie estimée des ressources (années)
PÉTROLE	17 milliards de barils	32	28 milliards de barils	37	50-80
GAZ NATUREL	1 076 milliards de m^3	39	2 500 milliards de m^3	65	160-310
CHARBON	2,2 milliards de tonnes	2 300	5 milliards de tonnes	217	très longue

Les estimations concernant les ressources sont définies comme la somme des « réserves identifiées » et des « ressources conventionnelles restant à découvrir ». Si l'on divise cette somme par la production en 2000, on obtient la durée de vie estimée des réserves de cette ressource en 2000. Le chiffre des réserves de charbon en 1970 n'est pas comparable à celui de 2000 du fait de définitions différentes du terme « réserve ». Le charbon a toujours été et continue à être le combustible fossile le plus abondant. **(Sources : U. S. Bureau of Mines ; Département américain de l'Énergie)**

carbone, en vapeur d'eau, en dioxyde de soufre et en un certain nombre d'autres substances qui ne peuvent en aucun cas, à une échelle de temps significative pour l'humanité, se recombiner pour donner de nouveau des combustibles fossiles. Ils constituent au contraire des déchets et des substances polluantes qui pénètrent dans les exutoires de la planète.

Ceux qui interprètent les découvertes de ces 30 dernières années comme le signe qu'il n'y a pas de limite immédiate aux réserves de combustibles fossiles ne prennent en compte qu'une partie du système énergétique :

GRAPHIQUE 6 – Des réserves connues aux combustibles transformés

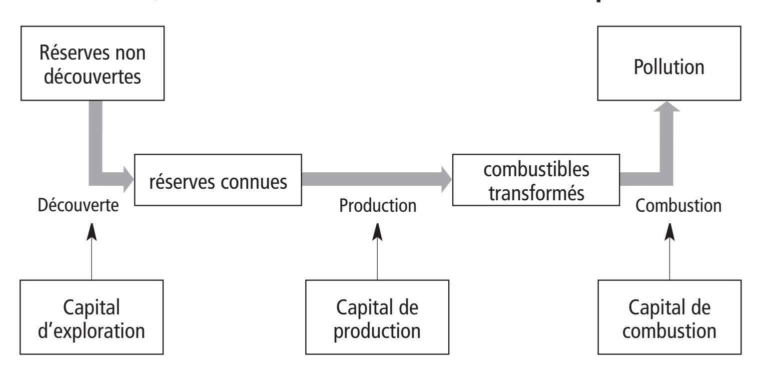


Le processus de *découverte* nécessite un *capital d'exploration* (plateformes de forage, avions, satellites, batterie sophistiquée de sondeurs et de sondes) pour trouver les gisements de combustibles fossiles sous terre et augmenter ainsi la quantité de *réserves* identifiées mais pas encore exploitées. Le processus de production consiste à extraire ces réserves du sol à l'aide du *capital de production* (matériels d'extraction, de pompage, de raffinage et de transport) et à les acheminer sur les lieux où sont entreposés les combustibles transformés. Là, le *capital de combustion* (fourneaux, automobiles, générateurs d'électricité) brûle les *combustibles transformés*, produisant ainsi une chaleur utilisable[65].

65. Bien entendu, les équipements qui permettent de découvrir, d'extraire, de pomper, de transporter et de raffiner les combustibles les brûlent également. En l'absence de quelque limite que ce soit, la limite ultime à l'utilisation des combustibles fossiles se caractériserait par le stade où cela demanderait autant

Tant que le rythme des découvertes est plus soutenu que celui de la production, le stock de réserves connues augmente. Mais le diagramme ci-dessus ne montre qu'une partie du système. Un diagramme plus complet doit inclure les sources et les exutoires ultimes des combustibles fossiles :

GRAPHIQUE 7 – Des réserves non découvertes à la pollution



Tandis que la *production* réduit le stock de *réserves connues*, les humains investissent dans l'exploration pour le réalimenter. Mais chaque découverte puise dans le stock ultime de combustibles fossiles de la Terre, qui ne se reconstitue pas. Le stock de *réserves encore inconnues* peut être très grand, il est néanmoins fini et non renouvelable.

À l'autre extrémité du flux, la combustion produit des substances polluantes qui pénètrent dans l'exutoire ultime, c'est-à-dire dans le processus biogéochimique de la planète qui les recycle, qui les rend non toxiques, ou qui est empoisonné ou dégradé. Des polluants de différentes sortes sont également émis à chaque stade du flux des combustibles fossiles, depuis l'exploration jusqu'à la production, le raffinage, le transport et le stockage. Et même si

d'énergie de se procurer les combustibles fossiles que ces derniers n'en renferment. Voir Charles A.S. Hall et Cutler J. Cleveland, « Petroleum Drilling and Production in the United States : Yield per Effort and Net Energy Analysis », *Science*, vol. 211, n° 4482, 6 février 1981.

l'éco-efficience a fait des progrès notables ces dix dernières années, réduisant les émissions de polluants grâce à une meilleure gestion des opérations, la production énergétique reste une importante source de pollution des eaux souterraines aux États-Unis.

Personne ne sait exactement qui de la source ou de l'exutoire du flux de combustibles fossiles sera la limite la plus contraignante. En 1972, à la veille de la flambée des prix du pétrole décidée par l'OPEP, la source semblait être le goulet d'étranglement le plus évident. Mais aujourd'hui, comme nous mettons davantage l'accent sur le changement climatique, c'est l'exutoire qui semble poser problème. Il reste une telle quantité de charbon que nous pensons que son exploitation sera limitée par l'exutoire atmosphérique qui recueille le dioxyde de carbone. Le pétrole, lui, sera limité aux deux extrémités : sa combustion émet des gaz à effet de serre et d'autres polluants, et il sera certainement le premier combustible fossile à être épuisé à la source. Quant au gaz naturel, il est considéré par beaucoup comme la ressource qui pourra assurer la production d'énergie jusqu'à ce que les sources d'énergie durables soient exploitées à grande échelle. Mais il a toujours fallu une cinquantaine d'années aux sociétés pour passer d'une source d'énergie dominante à une autre. Et entre-temps, le monde pourrait avoir perdu en bien-être, soit à cause du changement climatique, soit à cause des limitations imposées à l'utilisation des combustibles fossiles.

Les estimations concernant les réserves de pétrole et de gaz encore inconnues varient énormément et comportent toujours une marge d'erreur, mais nous en avons inclus plusieurs dans le tableau 3-1. Elles présentent une fourchette très large du fait des incertitudes inhérentes aux estimations. On voit que les ressources de pétrole restantes (définies comme la somme des réserves actuelles et des réserves encore inconnues) pourraient durer de 50 à 80 ans selon leur rythme d'exploitation de l'année 2000, tandis que celles de gaz naturel pourraient durer de 160 à 310 ans. Le charbon est encore plus abondant. Bien évidemment, le coût de l'évaluation des ressources résiduelles va aller croissant

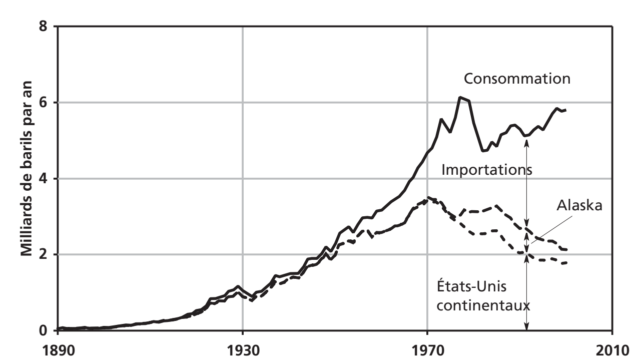
au fur et à mesure que les ressources vont s'amenuiser. Et des coûts politiques pourraient s'ajouter aux coûts de production : en 2000, en effet, 30 % de la production mondiale de pétrole venait du Moyen-Orient et 11 %, de l'ex-URSS ; à elles deux, ces régions détiennent les deux tiers de toutes les réserves de pétrole connues.

Les ressources de pétrole ne s'épuiseront pas du jour au lendemain, comme un robinet qui s'arrêterait brusquement de couler. Au contraire, cet épuisement se caractérisera par des retours sur investissement de plus en plus faibles en matière d'exploration, par une concentration grandissante des réserves résiduelles dans un petit nombre de pays, puis par un pic et enfin par une baisse progressive de la production mondiale. Les États-Unis constituent à cet égard un cas d'école. Leurs énormes réserves au début de leur histoire sont aujourd'hui épuisées à plus de 50 %. La découverte de nouveaux gisements a connu un pic dans les années 1940 et 1950 et la production étatsunienne de pétrole a atteint son apogée aux alentours de 1970. Aujourd'hui, le pays s'appuie de plus en plus sur les importations (voir figure 3-11).

Nous sommes sur le point d'assister au même phénomène au niveau international. La figure 3-12 montre deux scénarios relatifs à la production mondiale de pétrole d'après des hypothèses sur les ressources semblables à celles qui sont présentées dans le tableau 3-1. Le plus probable est que la consommation de pétrole n'augmente à aucun moment de façon significative par rapport à son niveau actuel, et qu'après quelques décennies, elle baisse progressivement pendant tout le reste du XXIe siècle. Ces scénarios sont étayés par le fait que le rythme des découvertes de nouveaux gisements au niveau mondial a déjà connu un pic dans les années 1960 et qu'à présent, ce sont des ressources de plus en plus difficiles d'accès et donc plus coûteuses qui sont exploitées, non seulement en Alaska, mais aussi dans les eaux profondes de l'océan Arctique et jusqu'en Sibérie.

Le gaz naturel peut être utilisé à la place du pétrole dans de nombreux domaines. De tous les combustibles fossiles, c'est celui qui pollue le moins par unité d'énergie, y compris en matière de

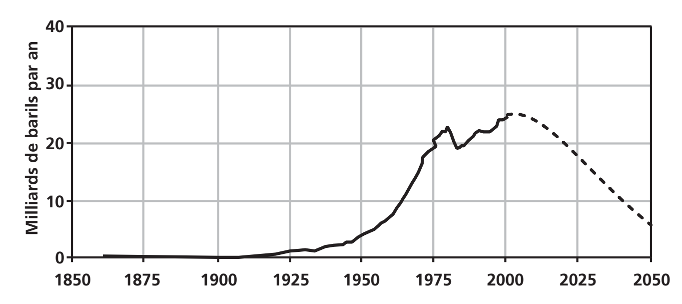
FIGURE 3-11 – Production et consommation de pétrole aux États-Unis



La production étatsunienne de pétrole a connu un pic en 1970 et la production des États-Unis continentaux a baissé depuis de 40 %. Les nouveaux gisements découverts en Alaska ne parviennent pas à compenser cette baisse. **(Source : API ; AIE/Département américain de l'Énergie)**



FIGURE 3-12 – Scénarios concernant la production mondiale de pétrole



La production mondiale de pétrole jusqu'en 2000 est représentée par la courbe continue. Nous avons utilisé les méthodes du géologue King Hubbert pour évaluer le scénario le plus probable concernant la production à venir. La courbe en pointillés à droite représente le taux de production probable si la quantité de pétrole qui reste à découvrir s'élève à 1,8 millier de milliards de barils (quantité représentée par la zone située sous la courbe). **(Source : K. S. Deffeyes)**

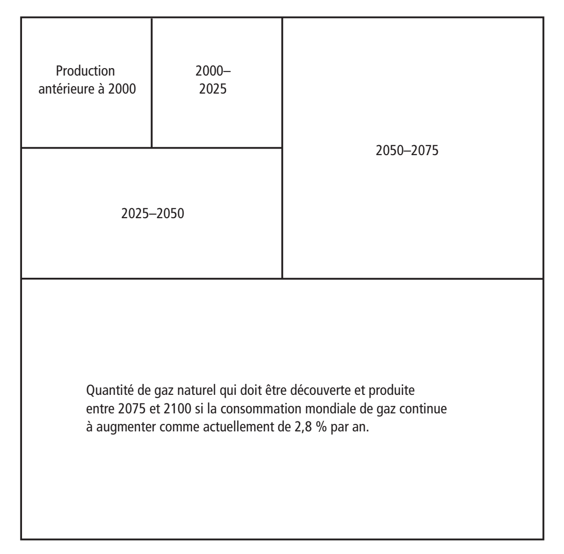
FIGURE 3-13 – Différents scénarios possibles de l'épuisement des ressources mondiales de gaz

Si les « dernières ressources récupérables » de gaz naturel peuvent permettre de tenir 260 ans au taux d'utilisation de 2000, la consommation pourra se maintenir en l'état jusqu'en 2260. Mais la raréfaction du pétrole ainsi que les problèmes environnementaux liés au charbon pourraient accélérer la consommation de gaz lors des prochaines décennies. Si cette dernière continuait à augmenter comme elle le fait actuellement, c'est-à-dire de 2,8 % par an, les ressources supposées seraient épuisées en 2075. Avec une augmentation de 5 % par an, l'épuisement interviendrait dès 2054.

CO_2, gaz responsable de l'effet de serre. C'est pourquoi il faudrait qu'il remplace rapidement le pétrole et le charbon. Mais cela va accélérer la baisse des ressources de gaz à un rythme qui risque de surprendre les personnes qui connaissent mal la dynamique de la croissance exponentielle. Les figures 3-13 et 3-14 nous expliquent pourquoi.

En 2000, le ratio réserves/production du gaz naturel était de 65 ans, ce qui signifie que si les réserves actuellement connues continuaient à être exploitées selon le rythme de consommation de cette année-là, elles dureraient jusqu'en 2065. Mais deux phénomènes vont se produire qui vont infirmer cette simple extrapolation : d'une part, de nouvelles réserves vont être découvertes et d'autre part, la consommation de gaz va dépasser celle de l'an 2000.

FIGURE 3-14 – Quantités de nouveaux gisements nécessaires pour maintenir l'augmentation actuelle de la consommation de gaz



Si le taux d'accroissement de la consommation de gaz naturel continue à être de 2,8 % par an, il faudra, tous les 25 ans, découvrir de nouvelles quantités de gaz équivalentes à toutes les quantités découvertes jusqu'à présent.

Il est donc préférable de s'appuyer sur les estimations des ressources de gaz restantes (soit la somme des réserves actuelles et des réserves encore inconnues). Supposons, pour faciliter la démonstration, que les ressources de gaz s'avèrent finalement suffisantes pour approvisionner la planète au taux d'utilisation de 2000 pendant 260 ans. Cela nous situe alors quelque part au milieu de la fourchette de 160 à 310 ans indiquée dans le tableau 3-1. Si le taux d'utilisation de 2000 restait constant, les ressources de gaz diminueraient donc de façon linéaire, comme le montre la diagonale de la figure 3-13 et dureraient 260 ans. Mais si la consommation de gaz continuait à augmenter comme elle le fait depuis 1970, soit d'environ 2,8 % par an, le chiffre de 260 années de réserves chuterait de façon exponentielle, comme le montre la

courbe du milieu sur la figure 3-13. Les ressources ne seraient alors pas épuisées en 2260, mais en 2075 ; elles ne dureraient donc pas 260 ans, mais seulement 75.

Et si, afin de freiner le changement climatique et d'éviter l'épuisement des ressources en pétrole, les pays du monde entier décidaient de remplacer les sources d'énergie que sont le charbon et le pétrole par le gaz naturel, la consommation pourrait bien augmenter de plus de 2,8 % par an. Si elle augmentait de 5 %, les ressources, censées durer au départ 260 ans, seraient épuisées en 54 ans.

La figure 3-14 montre dans quelle mesure la quantité de nouveaux gisements découverts va devoir augmenter afin de permettre à la consommation de gaz de continuer à croître de 2,8 % par an. Selon les règles de la croissance exponentielle, la quantité de gaz découvert et produit devrait doubler tous les 25 ans.

Notre but n'est pas de dire que la planète est sur le point de manquer de gaz naturel. Les ressources considérables dont nous disposons seront essentielles, car elles serviront de combustible de transition en attendant des sources d'énergie plus durables. Notre but est de souligner que les combustibles fossiles sont présents en quantité étonnamment limitée, surtout s'ils sont utilisés de façon exponentielle : il ne faut donc pas les gaspiller. À l'échelle de l'histoire humaine, l'ère des combustibles fossiles n'aura en définitive représenté qu'un court mais mauvais moment à passer.

Grâce à l'existence de substituts renouvelables aux combustibles fossiles, nous ne sommes pas condamnés à une pénurie mondiale d'énergie. Il existe deux solutions énergétiques, durables à la source, acceptables sur le plan environnemental, techniquement faisables et de plus en plus économiques. La première, l'amélioration de notre *efficacité*, peut être mise en œuvre rapidement. La seconde, les *énergies renouvelables liées au solaire*, va prendre un tout petit peu plus de temps. Certains ajouteraient l'énergie nucléaire à ce petit groupe de solutions potentielles au problème d'approvisionnement énergétique de la planète. Nous ne sommes pas de cet avis, car le problème de la gestion des

déchets n'est pas résolu et parce que les deux autres solutions sont beaucoup plus facilement réalisables. Elles sont plus rapides, moins coûteuses, plus sûres et bien plus faciles à mettre en œuvre dans les pays pauvres.

L'efficacité énergétique permet de fournir les mêmes services d'énergie finale – lumière, chaleur, refroidissement, transport de personnes et de marchandises, eau pompée, moteurs qui tournent – mais en utilisant moins d'énergie. Cela se traduit non seulement par une qualité de vie matérielle égale ou supérieure, mais aussi et souvent par un moindre coût énergétique direct, par moins de pollution, un moindre recours aux sources d'énergie nationales, moins de conflits relatifs à l'emplacement des installations et, pour de nombreux pays, une dette extérieure moins élevée et des dépenses militaires moindres pour garantir l'accès aux ressources étrangères ou pour contrôler ces dernières.

Les technologies d'efficacité énergétique, depuis les systèmes d'amélioration de l'isolation jusqu'aux moteurs plus intelligents, progressent à un rythme si soutenu que les estimations quant à l'énergie nécessaire pour accomplir toutes sortes de tâches doivent chaque année être revues à la baisse. Une ampoule fluocompacte fournit ainsi la même quantité de lumière qu'une ampoule à incandescence, mais consomme 75 % d'électricité en moins. Si tous les immeubles étatsuniens étaient équipés de fenêtres super isolantes, le pays économiserait deux fois l'énergie que lui fournit aujourd'hui le pétrole venu d'Alaska. Dix constructeurs automobiles au moins ont conçu des prototypes qui peuvent parcourir entre 30 et 60 km avec un litre d'essence, et dans les débats techniques de pointe, on commence désormais à entendre parler de véhicules pouvant parcourir jusqu'à 70 km. Et contrairement à ce que l'on croit souvent, ces voitures efficaces réussissent tous les tests de sécurité habituels et certaines ne coûtent pas plus cher à la construction que les modèles actuels[66].

66. Ces informations ainsi que la plupart des données que nous reprenons sur ce sujet nous viennent d'Amory Lovins et du Rocky Mountain Institute.

Les calculs sur la quantité d'énergie potentiellement économisée grâce à une meilleure efficacité dépendent des préférences techniques et politiques de ceux qui calculent. En restant prudent, il semble acquis que l'économie étatsunienne peut conserver son rythme actuel, à partir des technologies existantes et pour un coût équivalent voire moindre, en consommant moitié moins d'énergie. Le pays aurait la même efficacité que les pays d'Europe de l'Ouest[67] et réduirait les besoins mondiaux en pétrole et en charbon de 14 % et ceux en gaz de 15 %. De telles améliorations, voire des améliorations plus notables encore en matière d'efficacité, sont possibles en Europe de l'Est et dans les pays moins développés.

Pour les optimistes, il ne s'agit là que d'un début. Ils estiment en effet que l'Europe de l'Ouest et le Japon, qui sont déjà les régions du monde les plus efficaces sur le plan énergétique, pourraient encore être deux à quatre fois plus efficaces grâce aux technologies actuelles ou à des techniques dont l'existence est tout à fait envisageable d'ici une vingtaine d'années. Si l'on parvenait à un tel degré d'efficacité, on pourrait fournir à la planète la majeure partie voire toute l'énergie dont elle a besoin à partir de sources renouvelables liées au rayonnement solaire : énergie solaire, éolienne, hydraulique et biomasse. Le soleil déverse en effet chaque jour 10 000 fois plus d'énergie sur la Terre que les humains n'en utilisent actuellement[68].

Les progrès techniques dans la capture de l'énergie solaire ont été plus lents que ceux qui ont permis d'accroître l'efficacité énergétique, mais ils ont été réguliers. Le coût de l'électricité

Pour de plus amples informations sur les solutions d'efficacité énergétique dans les transports, l'industrie et le bâtiment, consulter *Scientific American*, vol. 263, n° 3, septembre 1990.

67. PNUD, *Indicateurs du développement humain 2003*, <http://hdr.undp.org>.

68. Actuellement, la consommation totale de combustibles fossiles par les humains représente un flux d'énergie d'environ 5 térawatts (milliards de kilowatts). Le flux constant du rayonnement solaire sur la Terre équivaut à 80 000 térawatts.

d'origine photovoltaïque et éolienne a nettement baissé ces vingt dernières années (figure 3-15). En 1970, on produisait de l'électricité d'origine photovoltaïque (PV) pour un coût de 120 dollars le watt. En 2000, ce coût avait chuté à 3,50 dollars le watt[69]. Dans les pays en développement, le photovoltaïque représente d'ores et déjà la solution la plus rentable pour les villages et les projets d'irrigation qui n'ont pas les moyens financiers d'être reliés à un réseau électrique souvent éloigné.

Grâce à son coût actuel, l'énergie éolienne peut espérer une croissance très rapide. Fin 2002, la capacité mondiale de l'éolien dépassait les 31 000 MW, soit l'équivalent de plus de 30 réacteurs nucléaires. Cela représentait une augmentation de 28 % de la capacité depuis la fin 2001 et une multiplication par 4 en 5 ans depuis fin 1997[70]. De tels changements autorisent toutes sortes de spéculations quant à l'avenir de l'énergie.

> *Je pense que nous vivons les derniers jours des sociétés pétrolières telles que nous les avons connues… C'est l'économie de la planète tout entière qui est modifiée quand on gare sa voiture et qu'on utilise la pile à combustible afin de produire de l'électricité pour son usage domestique. Le réseau électrique d'un pays est en train de ressembler davantage à Internet qu'à une unité centrale. Si tous les véhicules circulant sur les routes étatsuniennes étaient équipés de piles à combustible, le pays disposerait de 5 fois sa capacité électrique actuelle*[71].

Les sources d'énergie renouvelable ne sont ni sans conséquence sur l'environnement ni illimitées. Les éoliennes nécessitent du terrain et des routes d'accès. Certains types de cellules solaires contiennent des matériaux toxiques. Les barrages hydroélectriques inondent des terres et empêchent les cours d'eau de couler librement. L'énergie de la biomasse n'est durable que dans

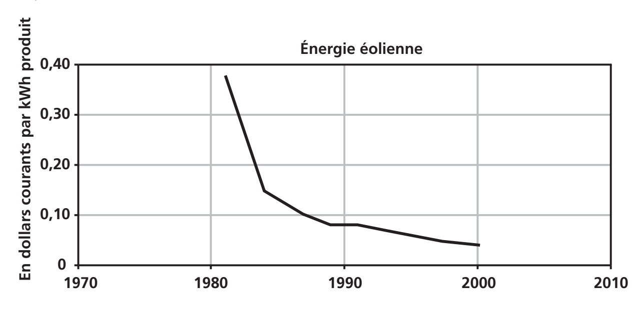
---

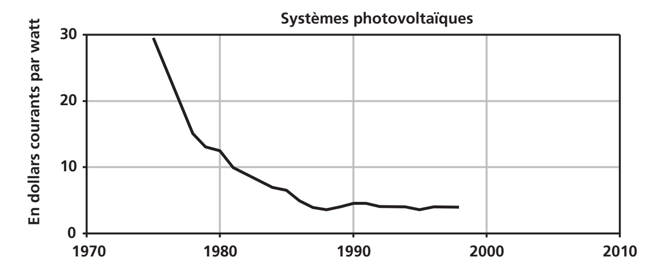
69. Lester Brown *et al.*, *Vital Signs 2000*, *op. cit.*

70. American Wind Energy Association, « Record Growth for Global Wind Power in 2002 », Washington, DC, AWEA, 3 mars 2002.

71. Peter Bijur, Global Energy Address au 17e Congrès du Conseil mondial de l'Énergie, Houston, 14 septembre 1998.

FIGURE 3-15 – Coût de l'électricité tirée de l'éolien et des systèmes photovoltaïques





Entre 1980 et 2000, le coût de l'électricité générée par les éoliennes et les systèmes photovoltaïques a baissé de façon spectaculaire. L'éolien devient actuellement compétitif par rapport aux nouvelles centrales fonctionnant aux combustibles fossiles. **(Sources : AWEA ; EIA/Département américain de l'Énergie)**

la mesure où le sont aussi les pratiques agricoles et forestières qui la produisent. Certaines sources d'énergie solaire sont éparses et intermittentes et nécessitent de vastes zones de captage et de complexes mécanismes de stockage[72], et toutes demandent des capitaux physiques et une gestion prudente. Les sources d'énergie renouvelables sont aussi limitées dans leur débit ; elles peuvent

72. Le mécanisme de stockage le plus prometteur semble être l'hydrogène produit à partir de la décomposition par électrolyse solaire des molécules d'eau. L'hydrogène représente également une solution future pour la propulsion des véhicules. Sur ce sujet, lire le chapitre 5 d'*Éco-économie* de Lester Brown.

être sans fin, mais elles fonctionnent avec un débit fixe. Elles ne peuvent pas alimenter un nombre indéfiniment élevé de personnes et un capital industriel qui se développe très rapidement. Mais elles peuvent fournir la base énergétique de la société durable du futur. Elles sont abondantes, variées et omniprésentes. Leurs flux de pollution sont moindres et généralement moins nocifs que ceux des énergies fossiles et du nucléaire.

Si les sources d'énergie les plus durables et les moins polluantes étaient développées et exploitées avec une grande efficacité, elles pourraient répondre aux besoins des humains sans dépasser les limites. Cela nécessite simplement une volonté politique, quelques avancées technologiques et des changements modestes au niveau social.

Étant donné que les réserves encore inconnues de gaz naturel semblent assez vastes, on peut dire, en ce début de XXIe siècle, que les contraintes qui limitent le plus la consommation d'énergie sont à chercher du côté des exutoires. Le problème posé par le changement climatique dû aux émissions de dioxyde de carbone issues de notre consommation énergétique, est abordé plus loin dans ce chapitre.

Les matières

> *L'extraction ou l'exploitation de ressources naturelles primaires nécessitent souvent de déplacer ou de transformer de grandes quantités de matières qui peuvent modifier ou dégrader l'environnement tout en n'ayant aucune valeur économique. Ainsi, pour accéder à des gisements de métaux, à des minerais ou à des veines de charbon, il faut déplacer beaucoup de matière ou de terrain de couverture. Les minerais bruts doivent souvent être transformés ou concentrés avant de pouvoir être commercialisés, ce qui entraîne de nombreux déchets dont il faut se débarrasser… Tous ces flux font partie de l'activité économique d'un pays, mais ne sont quasiment jamais pris en compte ni comptabilisés dans l'économie monétaire. C'est pourquoi les statistiques sous-estiment la dépendance d'une économie industrielle vis-à-vis des ressources naturelles.*
>
> – World Resources Institute, 1997

Seuls 8 % des habitants de la planète possèdent une voiture. Des centaines de millions d'individus vivent dans des logements inadaptés ou n'ont pas de logement du tout, encore moins un réfrigérateur ou un téléviseur. Puisqu'il doit y avoir de plus en plus d'habitants sur Terre et que leur situation doit s'améliorer en matière de logements, de soins de santé, de services éducatifs et de biens matériels, nous aurons besoin de plus d'acier, de béton, de cuivre, d'aluminium, de plastique et de bien d'autres matériaux.

Le flux de matière provenant de la terre, passant dans l'économie et retournant à la terre peut être représenté de la même manière que le flux de combustibles fossiles, à une exception près : contrairement à ces derniers, des matières comme le métal ou le verre ne se transforment pas en gaz de combustion après utilisation. Soit elles s'accumulent quelque part sous forme de déchets solides, soit elles sont récupérées et recyclées, soit elles sont démolies, pulvérisées, lessivées, vaporisées ou dispersées d'une autre manière dans les sols, l'eau ou l'air.

GRAPHIQUE 8 – Des réserves inconnues au recyclage

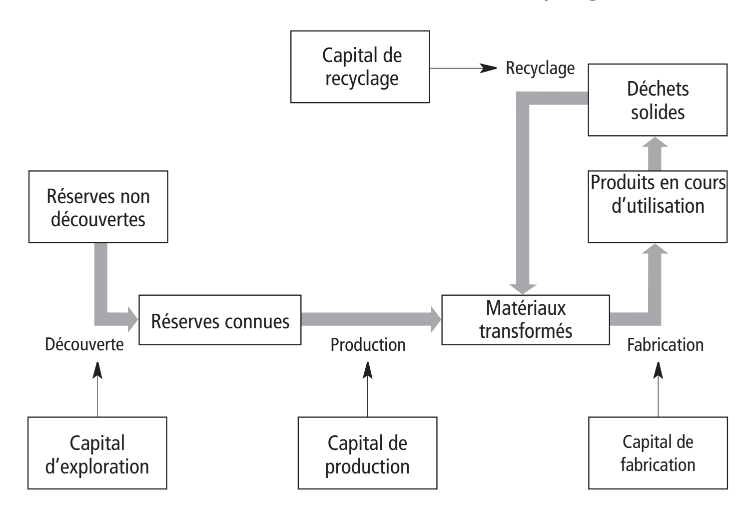
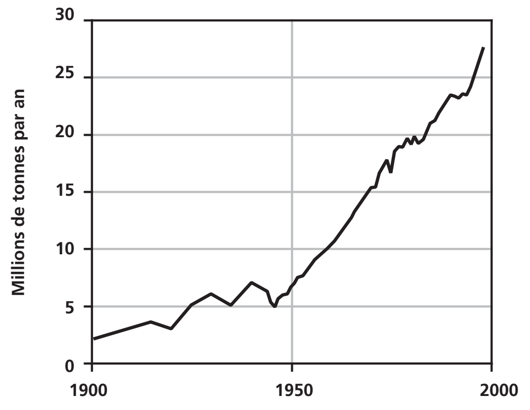


FIGURE 3-16 – Consommation mondiale de cinq métaux importants



La consommation de cuivre, plomb, zinc, étain et nickel a connu une hausse spectaculaire au cours du xxe siècle. **(Sources : Klein Goldewijk et Battjes ; U.S. Bureau of Mines ; USGS ; U.S. CRB)**

La figure 3-16 présente un historique de la consommation mondiale de cinq métaux importants entre 1900 et 2000. La courbe indique que la consommation a plus que quadruplé entre 1950 et 2000.

Il existe une limite à la quantité de cuivre, de nickel, d'étain et d'autres métaux que les populations, même riches, peuvent utiliser chaque année. Cette limite est cependant élevée, du moins si l'on en juge par le mode de vie étatsunien. Pour la plupart des métaux, la consommation moyenne par habitant dans un pays industrialisé est 8 à 10 fois celle d'un habitant d'un pays en développement. Si les neuf milliards d'habitants qui peupleront la Terre ont une consommation de matériaux équivalente à celle d'un Étatsunien moyen à la fin du xxe siècle, il faudra multiplier par 5 la production mondiale d'acier, celle de cuivre par 8 et celle d'aluminium par 9.

La plupart d'entre nous pressentent de façon intuitive que de tels flux de matière ne sont ni possibles ni nécessaires. Ils ne sont

FIGURE 3-17 – Consommation mondiale d'acier

La consommation d'acier affiche une croissance en forme de S **(Sources : Klein Goldewijk et Battjes ; U.S. Bureau of Mines ; USGS ; U.S. CRB)**

pas possibles à cause des limites inhérentes aux sources et aux exutoires de la planète. Tout le long du processus, de la source à l'exutoire, le traitement, la fabrication, la manipulation et l'utilisation de matériaux laissent de la pollution derrière eux. Ces flux ne sont pas non plus nécessaires, car le flux de matière par personne dans les pays riches à la fin du XX[e] siècle, que ce soit en matière d'aliments, d'eau, de bois ou d'énergie, est synonyme de gaspillage. Nous pourrions mener une existence satisfaisante en épargnant bien plus la planète.

Plusieurs signes indiquent que les humains tirent les leçons de tout cela. La figure 3-17 montre ainsi un historique récent de la production mondiale d'acier et l'on constate qu'un phénomène s'est produit au milieu des années 1970 qui a interrompu ce qui reflétait jusque-là une croissance parfaitement exponentielle. Plusieurs théories expliquent cette baisse du taux de croissance et toutes sont en partie exactes :

- La tendance naissante à la « dématérialisation » a été stimulée par des incitations économiques et par la possibilité offerte par la technologie de faire plus avec moins.

- Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont fait grimper les prix des métaux à forte intensité énergétique, incitant encore davantage à économiser l'énergie et la matière dans toutes les applications.
- Ces mêmes prix élevés, ainsi que les réglementations environnementales et les problèmes de traitement des déchets solides ont encouragé le recyclage des matériaux.
- Toutes ces pressions ont précipité l'avènement d'une révolution technique : le plastique, la céramique et d'autres matériaux ont remplacé les métaux, et les produits métalliques – voitures, cannettes de soda et bien d'autres – ont été allégés.
- Durant la stagnation de l'économie, dans les années 1980, les secteurs de l'industrie lourde ont été durement touchés, et la demande de métaux de base a baissé de façon disproportionnée[73].

Si la baisse de la consommation de matière a peut-être des raisons économiques passagères, les évolutions techniques vont, elles, sans doute perdurer, tout comme les pressions environnementales en faveur d'une réduction des flux de matière. Et il est intéressant de noter que le prix des matériaux a continué à baisser ces dix dernières années, preuve que l'offre était supérieure à la demande[74].

Le manque de sources a poussé les pays pauvres à toujours récupérer et recycler les matériaux. C'est le manque d'exutoires qui, actuellement, pousse les pays riches à réapprendre à le faire. Dans cette démarche, le recyclage cesse d'être une activité à forte intensité de main-d'œuvre pour en devenir une à forte intensité en capital et en énergie. Il nécessite des composteurs rotatifs, des broyeurs et des systèmes de filtrage cribles, des digesteurs, des mélangeurs de boue, des déconsigneurs (pour rembourser les

73. Voir John E. Tilton (dir.), *World Metal Demand*, Washington, D.C., Resources for the Future, 1980.

74. Organisation de coopération et de développement économiques, *Développement durable – Les grandes questions*, Paris, OCDE, 2001.

consignes des bouteilles) et des entreprises qui mettent en place des programmes de récupération des déchets pour l'industrie et les collectivités.

Les fabricants visionnaires conçoivent des produits, qu'il s'agisse de théières ou de voitures, en prévoyant leur désassemblage et leur recyclage final. La marque BMW a ainsi conçu une voiture avec une caisse en plastique pour en faciliter le recyclage. Le type de résine utilisé est de plus en plus souvent inscrit sur les plastiques et on mélange moins les résines les unes avec les autres, si bien que les plastiques peuvent être séparés et réutilisés.

L'accumulation de petits changements peut finir par faire une grosse différence. Grâce à l'invention, en 1976, de l'onglet avec anneau pour ouvrir les cannettes en aluminium, l'anneau reste attaché à la cannette et peut, lui aussi, être recyclé, plutôt que jeté. Vers la fin du XXe siècle, les Étatsuniens utilisaient quelque 105 milliards (10^9) de cannettes en aluminium par an dont environ 55 % était recyclées. Cela signifie que *chaque année*, le recyclage de ces petits anneaux a permis d'économiser 16 000 tonnes d'aluminium et environ 200 millions de kWh d'électricité[75].

Séparer et recycler les matériaux après utilisation, c'est faire un pas en direction de la durabilité. C'est faire évoluer la matière dans l'économie humaine comme elle évolue dans la nature, c'est-à-dire en cycles fermés. Dans la nature, les déchets issus d'un processus deviennent les intrants d'un autre. Des secteurs entiers d'écosystèmes, particulièrement dans les sols, travaillent à mettre de côté les déchets de la nature, à les séparer en entités exploitables et à en faire profiter des êtres vivants. L'économie

---

75. Communication personnelle d'Aleksander Mortensen, de l'entreprise de recyclage norvégienne Tomra ASA (<www.tomra.no>). En 2001, la production mondiale d'aluminium brut s'élevait à environ 21 millions de tonnes. Quelque 2,2 millions de tonnes de débris d'aluminium étaient en outre récupérés (<www.world-aluminium.org>). Les données sur les récipients de boissons sont tirées de <www.canadean.com> et sur le recyclage, de <www.container-recycling.org>.

humaine moderne est enfin en train de développer, elle aussi, son secteur recyclage[76].

Mais recycler les déchets signifie que l'on ne traite que la phase finale, soit la moins problématique, du flux de matière. Car il est une règle d'or qui veut que chaque tonne de déchets produite en fin de parcours par le consommateur nécessite la production de 5 tonnes de déchets durant la fabrication et de 20 tonnes sur le site d'extraction de la ressource (exploitation minière, pompage, exploitation forestière ou agricole)[77]. Le meilleur moyen de faire baisser ces flux de déchets est d'allonger la durée de vie utile des produits et de réduire les flux de matière à la source.

Augmenter la durée de vie d'un produit grâce à une meilleure conception, en les réparant et en les réutilisant (par exemple laver les verres au lieu d'en utiliser des jetables) est plus efficace que de les recycler, car cela ne nécessite pas de broyer, d'écraser, de faire fondre, de purifier et de fabriquer à nouveau des matériaux. En multipliant par deux la durée de vie moyenne d'un produit, on diminue de moitié la consommation d'énergie, les déchets, la pollution et l'épuisement ultime des matériaux nécessaires à sa fabrication. Mais pour arriver à déterminer ce qui réduit l'empreinte écologique d'un produit, il faut analyser en profondeur son cycle de vie, analyse qui réserve souvent bien des surprises.

Réduire le flux à la source signifie trouver un moyen de faire la même chose avec moins de matière. C'est l'équivalent de l'efficacité énergétique et les possibilités sont innombrables. En 1970, une voiture étatsunienne pesait en moyenne plus de 3 tonnes et était constituée presque exclusivement de métal. Aujourd'hui, elles sont beaucoup plus légères et sont essentiellement faites de plastique. Les circuits électroniques tiennent sur de minuscules

76. World Resources Institute, *Resource Flows : The Material Basis of Industrial Economies*, Washington, DC, WRI, 1997, fournit un résumé de la baisse d'intensité matérielle de quatre économies industrielles.

77. Pour avoir une vue d'ensemble de la production de déchets dans différents pays, voir l'OCDE, *Données OCDE sur l'environnement – Compendium 1999*, Paris, OCDE, 1999.

puces et n'ont plus besoin de passer par des bobines à noyau ferromagnétique. Une petite clé USB qui tient dans la poche peut contenir autant de données qu'un livre de 200 000 pages. Et une fibre de verre ultrapure, fine comme un cheveu, peut acheminer, avec un son de meilleure qualité, autant de conversations téléphoniques que des centaines de fils de cuivre.

Abandonnant les températures élevées, les fortes pressions, les produits chimiques agressifs et la force brute qui caractérisent les processus de fabrication depuis la révolution industrielle, les chercheurs commencent à comprendre comment exploiter l'intelligence des machines moléculaires et de la programmation génétique. Certaines avancées en matière de nano et de biotechnologie permettent aujourd'hui à l'industrie d'obtenir des réactions chimiques similaires aux réactions naturelles, grâce à une association minutieuse des molécules entre elles.

Si les possibilités de recycler, d'obtenir une plus grande efficacité, d'allonger la durer de vie des produits et de réduire les flux de matière à la source sont enthousiasmantes, elles ne se traduisent néanmoins pas, à l'échelle mondiale, par une réduction du gigantesque flux de matière qui alimente l'économie. Elles ont au mieux ralenti son rythme de croissance. Et les individus sans voiture ou réfrigérateur se comptent toujours par milliards. Bien que la plupart des personnes soient aujourd'hui plus conscientes des limites des exutoires que de celles des sources, la hausse de la demande de matériaux va finir par se heurter aussi aux limites imposées par les sources. Une grande partie des matériaux les plus utiles aux humains se présentent rarement sous forme concentrée dans la croûte terrestre. Leur exploitation a un coût de plus en plus élevé, un coût qui se mesure en énergie, en capital, en impact environnemental et en instabilité sociale.

Le géologue Earl Cook a montré à quel point la plupart des minerais exploitables sont étonnamment peu concentrés et rares[78].

78. Earl Cook, « Limits to Exploitation of Nonrenewable Resources », *Science*, vol. 191, n° 4228, 20 février 1976.

La technologie a certes fait de grands progrès depuis que Cook a livré son analyse, en 1976, mais les implications générales de son étude restent d'actualité. Certains minerais comme le fer et l'aluminium sont extrêmement abondants. En ce qui les concerne, il n'y aura pas de limite à la source et on peut les exploiter dans de nombreuses régions. D'autres, comme le plomb, l'étain, l'argent et le zinc, sont bien plus rares et leur épuisement est une perspective bien plus immédiate.

Les données d'une récente étude sur l'industrie minière mondiale, menée par l'Institut international pour l'environnement et le développement (IIED), donnent l'impression d'une relative rareté des ressources et des réserves. Le tableau 3-2 résume les données concernant huit métaux importants. Au rythme d'une croissance annuelle de 2 % (ce qui est élevé pour certains métaux et faible pour d'autres, mais constitue une moyenne raisonnable), les réserves actuelles peuvent répondre à la demande de production durant des périodes allant de 15 à 80 ans. Bien sûr, la technologie progressera et les prix augmenteront au fur et à mesure que les producteurs vont explorer de nouvelles zones et découvrir des matériaux exploitables. Ces estimations sur la durée de vie des réserves sont donc basses, mais à quel point ? Des estimations sur l'abondance de ces matières dans la croûte terrestre donnent des durées de vie productive comprises entre 500 et 1 000 ans. Les bons chiffres se situent donc quelque part entre les deux. La quantité de ressources pouvant devenir des réserves dépend du coût en énergie et en capital que cela représente, car les producteurs sont obligés de prendre en compte le coût social et environnemental de leurs opérations.

L'étude de l'IIED souligne le rôle que les exutoires pourraient être amenés à jouer dans la limitation de notre utilisation de minéraux.

Bien que les tendances en matière de production et d'utilisation de minéraux et que les estimations des stocks de ressources aient rassuré ceux qui craignaient que la planète doive affronter

TABLEAU 3-2 – Durée de vie des réserves identifiées de huit métaux

	Production annuelle – moyenne 1997-99	Croissance annuelle de la production – moyenne 1975-99	Réserves identifiées en 1999	Durée de vie des réserves identifiées avec une croissance annuelle de 2 % de la production	Stock de ressources	Durée de vie du stock de ressources avec une croissance annuelle de 2 % de la production
Métal	**Millions (10^6) de tonnes par an**	**% par an**	**Milliards (10^9) de tonnes**	**Années**	**Milliers de milliards (10^{12}) de tonnes**	**Années**
Bauxite	124	2,9	25	81	2 000 000	1 070
Cuivre	12	3,4	0,34	22	1 500	740
Fer	560	0,5	74 000	65	1 400 000	890
Plomb	3,1	- 0,5	0,064	17	290	610
Nickel	1,1	1,6	0,046	30	2,1	530
Argent	0,016	3,0	0,00028	15	1,8	730
Étain	0,21	- 0,5	0,008	28	40,8	760
Zinc	0,8	1,9	0,19	20	2 200	780

Ce tableau illustre l'énorme écart entre les réserves identifiées et le stock de ressources. Les premières sont connues et on espère pouvoir les exploiter grâce à la technologie dont nous disposons et selon les prix actuels. Le stock de ressources est la quantité totale que l'on pense être présente dans la croûte terrestre. Les humains ne seront jamais en mesure d'exploiter entièrement ce stock, mais l'évolution des prix et de la technologie, ainsi que de nouvelles découvertes vont sans doute accroître les réserves identifiées. **(Source : MMSD)**

une « pénurie » de minerais, les contraintes que les facteurs environnementaux et sociaux pourraient faire peser sur la disponibilité des minerais sont l'objet d'une attention croissante. Voici quelques-uns de ces facteurs :

- La disponibilité de l'énergie ou les effets sur l'environnement de son utilisation à mesure que sa quantité par unité produite augmente avec la diminution de la teneur en minerai ;
- La disponibilité de l'eau pour la production de minerais ou les impacts environnementaux de l'utilisation de quantités croissantes d'eau à mesure que la teneur en minerai diminue ;

- Le fait qu'une société préfère consacrer des terres à autre chose qu'à l'exploitation du minerai, soit pour protéger la biodiversité et un environnement naturel exceptionnel, soit parce que les terres ont une signification culturelle, soit pour assurer une sécurité alimentaire et agricole ;
- Le refus par la communauté des répercussions de l'exploitation du minerai ;
- L'évolution des modes de consommation ;
- Les limites de l'écosystème concernant l'accumulation de produits ou de sous-produits issus de l'exploitation du minerai (essentiellement des métaux) dans l'air, l'eau, la couche arable ou la végétation[79].

La figure 3-18 illustre le processus d'épuisement d'un minerai, en l'occurrence la baisse progressive de la concentration d'un minerai de cuivre. La figure 3-19 nous en montre les conséquences. À mesure que la teneur en métal exploitable du minerai diminue, la quantité de roche qui doit être extraite, pulvérisée et traitée par tonne de produit augmente à une vitesse vertigineuse.

Alors que la teneur moyenne du minerai de cuivre exploité à Butte, dans le Montana, chutait de 30 à 0,5 %, les résidus produits par tonne de cuivre passaient de 3 à 200 tonnes. La forme ascendante de la courbe des déchets est analogue à celle de l'énergie nécessaire pour produire chaque tonne de matériau final. L'épuisement des minerais métalliques précipite donc celui des combustibles fossiles, exerçant une pression plus forte encore sur les exutoires de la planète.

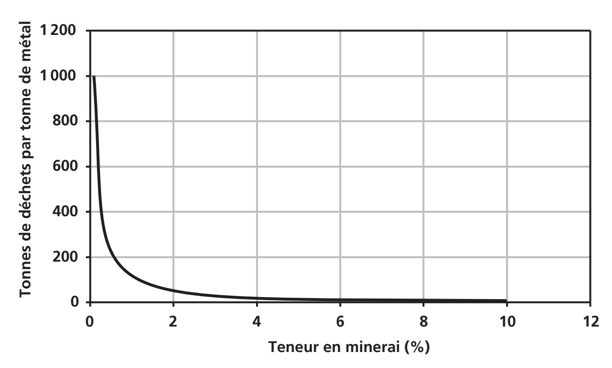
79. Institut international pour l'environnement et le développement et Conseil mondial des entreprises pour le développement durable, *Breaking New Ground : Mining, Minerals, and Sustainable Development*, Londres, Earthscan, 2002.

FIGURE 3-18 – La baisse de qualité des minerais de cuivre exploités aux États-Unis



L'exploitation des minerais étatsuniens contenant en moyenne entre 2 et 2,5 % de cuivre est antérieure à 1910. Depuis, on enregistre une baisse continue de la teneur moyenne. Le pic dans les années 1930 et la légère hausse dans les années 1980 sont dus aux récessions économiques qui ont entraîné la fermeture des mines marginales, ne laissant en exploitation que les gisements les plus riches. **(Sources : U.S. Bureau of Mines ; USGS)**

FIGURE 3-19 – L'épuisement des minerais accroît fortement la quantité de déchets miniers issus de leur production



Lorsque la teneur moyenne baisse avec l'épuisement du minerai et passe de 8 % et plus à 3 %, l'augmentation de la quantité de déchets miniers générée par tonne de matériau final est à peine perceptible. En dessous de 3 %, en revanche, la quantité de déchets augmente de façon spectaculaire. Le coût du traitement des déchets finit par être supérieur à la valeur du métal produit.

Exutoires pour la pollution et les déchets

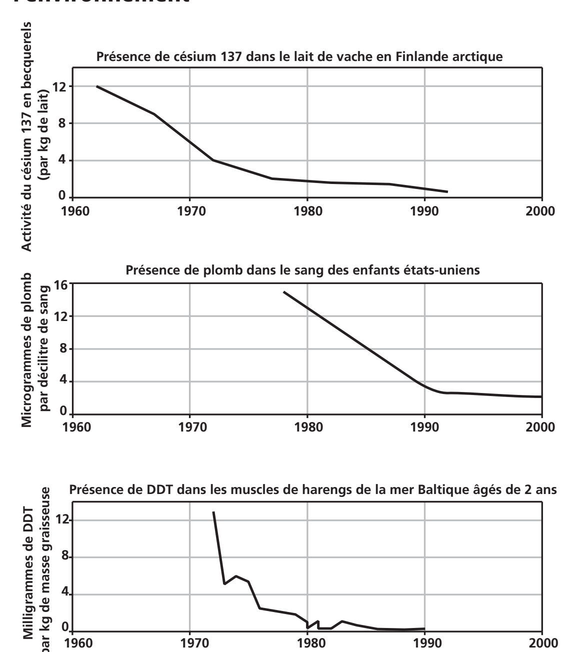
> *Durant les quelques dizaines d'années qui viennent de s'écouler, les hommes sont apparus comme une nouvelle force de la nature. Nous altérons les systèmes physiques, chimiques et biologiques de façon inédite, à un rythme plus soutenu et à une échelle spatiale plus étendue que tout ce que la Terre a jamais connu. Les hommes se sont involontairement embarqués dans une vaste expérimentation avec leur planète. Si nous ne connaissons pas l'issue de cette expérimentation, nous savons en revanche qu'elle a de profondes implications pour toutes les formes de vie sur Terre.*
>
> – Jane Lubchenco, 1998

À l'époque de la Conférence de Stockholm sur l'environnement, en 1972, on ne dénombrait pas plus de 10 pays dotés d'un ministère de l'environnement ou d'une agence environnementale. Aujourd'hui, ce sont ceux qui n'en ont pas qui font exception. Des programmes d'éducation à l'environnement ont fait leur apparition un peu partout, ainsi que de nombreux groupes d'intérêt soutenant diverses causes environnementales. Le bilan que l'on peut tirer de l'apparition de ces institutions de protection de l'environnement est mitigé. Il serait faux d'en conclure que la planète a résolu ses problèmes de pollution, mais il serait tout aussi faux de dire qu'aucun progrès n'a été accompli.

Les plus grands succès sont enregistrés à l'égard de substances toxiques bien précises dont la dangerosité pour la santé humaine est unanimement reconnue et qui peuvent être isolées et facilement interdites. La figure 3-20 montre ainsi que l'interdiction du plomb dans l'essence aux États-Unis a permis une baisse de sa concentration dans le sang chez les habitants. Les taux relatifs à d'autres polluants dans certains pays, comme le césium 137 en Finlande ou le DDT dans les pays baltes, ont également baissé au cours des dernières décennies.

Dans les pays développés, au terme d'efforts répétés et de dépenses considérables, on a enregistré une baisse partielle de certaines des substances polluantes les plus répandues dans l'air

FIGURE 3-20 – Baisse de la contamination des humains et de l'environnement

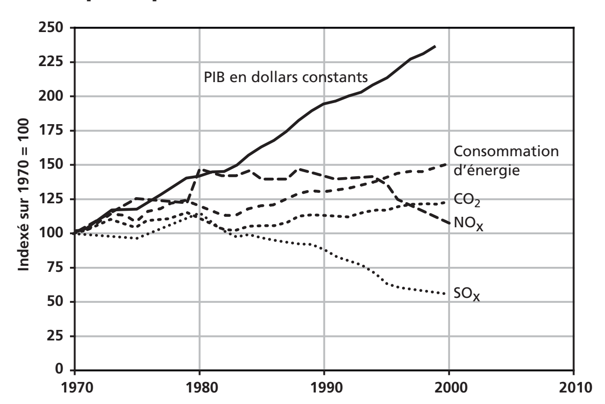


Les taux de plusieurs polluants ont baissé à certains endroits au cours de ces quelques décennies. Les progrès les plus spectaculaires ont été obtenus grâce à l'interdiction totale de substances toxiques telles que le plomb dans l'essence et l'insecticide connu sous le nom de DDT, ou encore grâce à l'arrêt des essais nucléaires dans l'atmosphère. **(Sources : Institut suédois de recherche sur l'environnement ; AMAP ; EPA)**

et dans l'eau, mais pas de toutes. La figure 3-21 montre que dans les pays du G7[80], les émissions de dioxyde de soufre ont été réduites de près de 40 % grâce à des épurateurs installés sur les cheminées et grâce au passage au fioul pauvre en soufre. Les polluants que sont le dioxyde de carbone et l'oxyde d'azote sont difficiles à

80. États-Unis, Japon, Grande-Bretagne, France, Allemagne, Italie et Canada.

FIGURE 3-21 – Tendances des émissions de certains polluants atmosphériques



Les pays industrialisés ont fait d'importants efforts en matière d'efficacité énergétique et de contrôle des émissions. Bien que leur PIB ait doublé depuis 1970, leurs émissions de CO_2 et d'oxydes d'azote (NO_x) sont restées quasiment stables (en grande partie grâce à une plus grande efficacité énergétique), et leurs émissions d'oxydes de soufre (SO_x) ont baissé de 40 % (grâce à la fois à l'efficacité énergétique et à des technologies de réduction efficaces). **(Sources : Banque mondiale ; OCDE ; WRI)**

épurer ; si on a réussi à maintenir leur concentration à peu près constante depuis vingt ans malgré la croissance économique, c'est essentiellement grâce aux progrès accomplis en matière d'efficacité énergétique.

L'histoire des polluants présents dans le Rhin illustre parfaitement les avancées et les échecs du contrôle de la pollution de l'eau. Après la Seconde Guerre mondiale, l'augmentation de la pollution a progressivement privé le Rhin de son oxygène vital. Ce dernier est tombé à son niveau le plus bas vers 1970, niveau auquel aucune vie n'était plus possible, mais la situation s'était nettement améliorée en 1980 grâce avant tout à d'importants investissements dans des systèmes de traitement des eaux usées. Les métaux lourds toxiques comme le mercure et le cadmium sont cependant restés, et ce n'est que lorsque les différents pays

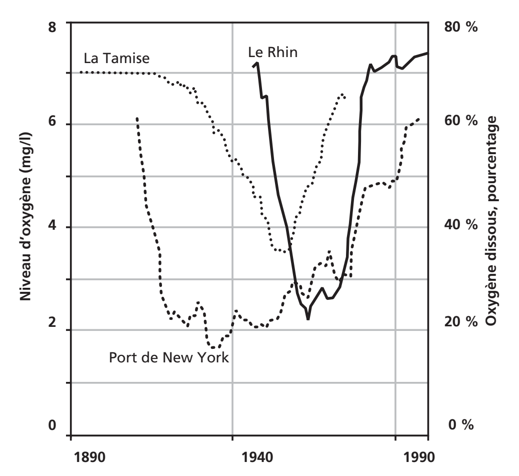
traversés par le Rhin se sont mis d'accord pour faire appliquer une réglementation de plus en plus stricte contre la pollution que leur concentration a commencé à baisser. Résultat : en 2000, les eaux du fleuve étaient en grande partie libérées de leurs métaux lourds. Mais ces derniers imprègnent encore les sédiments du fond et comme ils ne se décomposent pas chimiquement, ils restent présents à des niveaux élevés, particulièrement dans le delta du Rhin. Les taux de chlorures restent eux aussi élevés. Les pays situés en aval du fleuve n'ont toujours pas trouvé de moyen de faire pression de manière efficace contre la principale source de chlorures, les mines de sel d'Alsace, même si celles-ci pourraient finir par fermer. La pollution à l'azote due aux ruissellements d'engrais utilisés sur les terres agricoles est elle aussi importante. Et comme les sources de ce polluant sont trop dispersées les unes par rapport aux autres pour toutes passer dans un système de traitement des eaux usées, le seul moyen de réduire cette pollution est de changer les pratiques agricoles tout le long du bassin versant du Rhin. Mais malgré cela, la réapparition à Baden-Baden en 1996 d'un saumon, après 60 ans d'absence dans la vallée supérieure du Rhin, a constitué un véritable événement[81].

De la même façon, d'autres pays industrialisés ont réalisé d'importants investissements pour améliorer la qualité de grands cours d'eau. Grâce à l'investissement de dizaines de milliards de dollars dans des stations d'épuration, d'anciens cloaques ont aujourd'hui la qualité requise pour accueillir des saumons. L'exemple le plus connu à cet égard est sans doute celui de la Tamise. Mais même les eaux du port de New York sont devenues plus propres à partir de 1970 (figure 3-22)[82]. Nettoyer les eaux d'un fleuve, cela signifie faire baisser les émissions par

81. Les informations citées dans ce paragraphe proviennent d'Urs Weber, « Le miracle du Rhin », *Le Courrier de l'UNESCO*, juin 2000, et de la base de données du site Internet de la Commission internationale pour la protection du Rhin, <www.iksr.org>.

82. Bjørn Lomborg, *L'écologiste sceptique – Le véritable état de la planète*, Paris, Le cherche midi, 2004.

FIGURE 3-22 – Niveaux d'oxygène dans certaines eaux polluées



La pollution organique peut entraîner la baisse du niveau d'oxygène qui rend la vie possible dans les cours d'eau. Depuis les années 1960 et 1970, d'importants investissements dans des systèmes de traitement des eaux usées ont permis d'augmenter le niveau d'oxygène dans le Rhin, la Tamise et le port de New York. **(Sources : A. Goudie ; P. Kristensen et H. Ole Hansen ; OCDE ; DEP)**

unité d'activité plus vite que n'augmente le niveau de l'activité humaine. L'empreinte écologique des cours d'eau a ainsi diminué. Il en va de même pour la qualité de l'air dans de nombreux pays industrialisés. Grâce tout à la fois à une réglementation stricte, à des investissements dans des dispositifs de filtrage et à des technologies de production plus propres, le niveau de la pollution de l'air (par exemple la présence de particules, de dioxyde de soufre, de monoxyde de carbone et de plomb) a baissé de façon spectaculaire au Royaume-Uni et aux États-Unis depuis plusieurs dizaines d'années. Même la quantité de polluants plus difficiles à maîtriser, comme le NO_2 et l'ozone dans la basse atmosphère, a été réduite[83]. Et, là encore, cette diminution a été possible en

83. *Ibid.*

dépit d'une importante croissance d'activités telles que la production d'électricité et de chaleur et le transport de personnes et de marchandises. Les humains ont même progressé dans la suppression des toxines modernes parmi lesquelles les PCB, le DDT et d'autres pesticides[84]. Mais là, les succès sont surtout locaux et le bilan est plus mitigé, car nombre de ces substances persistantes et bioaccumulables sont transportées à travers la planète et s'accumulent dans la masse graisseuse de populations très éloignées les unes des autres.

Voilà ce que l'on observe concernant les sommes dépensées dans les pays riches pour lutter contre la pollution. Les pires niveaux de pollution de l'air et de l'eau dans le monde sont aujourd'hui enregistrés en Europe de l'Est et dans les pays émergents où il est tout simplement inimaginable de consacrer des milliards de dollars à faire baisser la pollution. Le monde entier s'en est aperçu en 2001 lorsqu'un vaste brouillard a assombri le ciel en Asie du Sud-Est plusieurs semaines durant.

Et voilà ce que l'on observe également au sujet des polluants les plus connus, ceux auxquels les individus sont directement confrontés et qui attirent l'attention des politiques. En outre, les polluants visibles de l'eau et de l'air se retrouvent de plus en plus, et avec un certain succès, étant donné l'intérêt exprimé à l'heure actuelle pour l'éco-efficience par les entreprises les plus soucieuses de l'environnement dans le monde. Il faut toutefois que cet intérêt devienne permanent si l'on veut contrebalancer l'augmentation ininterrompue de l'activité humaine.

Les polluants les plus incontrôlables sont, jusqu'à présent du moins, les déchets nucléaires, les déchets dangereux et les déchets qui représentent une menace pour les processus biogéochimiques de la planète, comme les gaz à effet de serre. Chimiquement, ce sont les plus difficiles à séquestrer ou à détoxifier, physiologiquement, ce sont ceux que nos sens détectent le moins facilement, et

---

84. *Ibid.*

économiquement et politiquement, ce sont ceux pour lesquels il est le plus difficile d'imposer une réglementation.

Aucun pays n'a résolu le problème des déchets nucléaires. Dans la nature, ils sont dangereux pour toute forme de vie, à cause de leur extrême toxicité et de leur pouvoir mutagène. Placés entre des mains mal intentionnées, ils peuvent être utilisés à des fins terroristes. La nature ne peut les rendre inoffensifs. Les déchets nucléaires se désintègrent à un rythme qui leur est propre, et cela prend des dizaines d'années, des siècles, voire des millénaires. En tant que sous-produits de la production nucléaire d'électricité, ils s'accumulent petit à petit et sont stockés sous terre ou dans des piscines situées dans l'enceinte de confinement des réacteurs nucléaires, dans l'espoir qu'un jour, la créativité technique et institutionnelle de l'être humain lui permette de trouver un endroit où les entreposer. Conséquence de tout cela : beaucoup restent à juste titre sceptiques quant à l'utilisation à grande échelle de l'énergie nucléaire.

Autres déchets posant des problèmes de taille : les produits chimiques synthétisés par l'homme. Ils n'existaient pas sur Terre jusque-là, si bien qu'aucun organisme n'a évolué dans la nature afin de les décomposer et de les rendre inoffensifs. Plus de 65 000 produits chimiques industriels sont aujourd'hui régulièrement commercialisés. Les données quant à leur toxicité ne sont disponibles que pour quelques-uns seulement. Et chaque jour, de nouveaux produits chimiques font leur entrée sur le marché sans que leur toxicité ait été suffisamment testée[85]. Chaque jour également, des milliers de tonnes de déchets dangereux sont produites dans le monde, dont la plupart dans les pays industrialisés. Le problème commence à être reconnu, lentement mais sûrement ; nombre de ces pays ont en effet entamé des démarches pour réhabiliter les sols et les nappes souterraines qui étaient empoi-

85. Commission mondiale de l'environnement et du développement, *Notre avenir à tous*, *op. cit.*

sonnés depuis des dizaines d'années par des déversements irresponsables de produits chimiques.

Et puis, il y a les matières contaminantes qui polluent la Terre dans son ensemble. Quels que soient les responsables de leurs émissions, ces matières touchent tout le monde. On peut citer à cet égard le terrible effet des produits chimiques appelés chlorofluorocarbones sur la couche d'ozone stratosphérique. Ce qui se passe pour l'ozone est d'ailleurs absolument fascinant dans la mesure où c'est la première confrontation évidente de l'humanité avec une des limites de la planète. Ce qui s'est passé est pour nous si important et si positif que nous y consacrons le chapitre 5.

La plupart des scientifiques, rejoints aujourd'hui par de nombreux économistes, estiment que la prochaine limite planétaire à laquelle l'humanité va être confrontée est l'effet de serre ou le changement climatique.

Le système climatique de la Terre a changé, au niveau mondial et régional, et certains de ces changements sont imputables à l'activité humaine.

- La Terre s'est réchauffée de 0,6 ± 0,2 °C depuis 1860, les deux dernières décennies ayant été les plus chaudes du siècle dernier ;
- L'augmentation des températures de surface dans l'hémisphère Nord sera sans doute plus importante au cours du XXe siècle qu'à n'importe quel autre siècle du dernier millénaire ;
- Le régime des précipitations a changé et l'on constate une hausse des fortes précipitations dans certaines régions ;
- Le niveau des mers a augmenté de 10 à 20 cm depuis 1900 ; la plupart des glaciers non polaires reculent ; l'étendue et l'épaisseur de la glace de l'océan Arctique diminuent en été ;
- Les activités humaines entraînent l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre qui réchauffent l'atmosphère et, par endroits, en aérosols sulfatés qui, au contraire, la refroidissent ;

- Le réchauffement observé ces 50 dernières années est principalement d'origine anthropique[86].

Cela fait des dizaines d'années que les scientifiques mesurent l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère due à l'utilisation de combustibles fossiles. Nous présentions déjà un résumé des données à ce sujet dans la première version de cet ouvrage[87]. On sait depuis plus de 100 ans que le CO_2 piège la chaleur et augmente la température sur Terre, à l'instar d'une serre qui laisse entrer l'énergie solaire mais l'empêche de s'échapper. Et ces 30 dernières années, il est devenu plus évident que jamais que d'autres gaz à effet de serre émis par les activités humaines s'accumulent eux aussi de façon exponentielle dans l'atmosphère : méthane, protoxyde d'azote et chlorofluorocarbones, ceux-là mêmes qui menacent la couche d'ozone (figure 3-23).

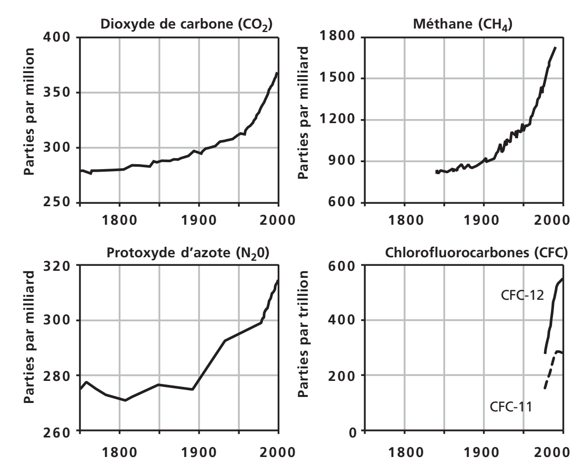
Le changement climatique n'est pas facile à détecter rapidement, car le temps varie naturellement d'un jour ou d'une année sur l'autre. Le climat représente la moyenne sur le long terme du temps qu'il fait, il ne peut donc être mesuré qu'à cette même échelle de temps. Les humains disposaient néanmoins de preuves du réchauffement climatique il y dix ans déjà, et depuis, le phénomène s'est accéléré à une vitesse alarmante. Il est devenu habituel de dire que l'année passée a été la plus chaude jamais enregistrée et cela n'a rien d'étonnant si l'on considère le rythme d'élévation de la température mondiale moyenne, comme le montre la figure 3-24.

Les satellites montrent que la couverture de glace et de neige sur l'hémisphère Nord diminue, la banquise arctique perd en épaisseur et des touristes occidentaux à bord d'un brise-glace russe ont récemment eu la surprise de trouver des eaux libres à

86. Troisième Rapport d'évaluation du GIEC, Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 19 juillet 2001. Disponible sur <www.ipcc.ch>.

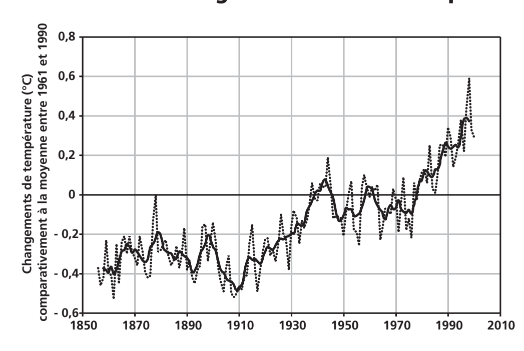
87. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers et William W. Behrens III, *The Limits to Growth*, *op. cit.*

FIGURE 3-23 – Concentrations en gaz à effet de serre au niveau mondial



Le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et les chlorofluorocarbones réduisent tous les émissions de chaleur de la Terre vers l'espace, ce qui accroît la température sur notre planète. La concentration atmosphérique de ces gaz, à l'exception des CFC qui n'ont été synthétisés pour la première fois qu'au milieu du XXe siècle, augmente depuis le XIXe siècle. **(Sources : CDIAC ; UNEP)**

FIGURE 3-24 – L'augmentation de la température mondiale



La température mondiale moyenne a augmenté d'environ 0,6 °C au cours du siècle dernier. La courbe en pointillés représente les moyennes annuelles, celle en gras, les moyennes glissantes sur cinq ans. **(Source : CDIAC)**

leur arrivée au pôle Nord. Cent cas de « blanchissement du corail » – les coraux deviennent blancs et meurent – ont été répertoriés entre 1980 et 1998, contre 3 au cours des 100 années précédentes. Ce blanchissement est une réaction qui se déclenche rapidement lorsqu'il y a une hausse inhabituelle de la température de l'océan[88].

Certains économistes – une corporation pourtant connue pour son scepticisme à l'égard de « l'alarmisme environnemental » – finissent par penser que quelque chose d'inhabituel et d'important est en train de se produire dans l'atmosphère et que cela pourrait avoir une origine anthropique. En 1997, un groupe composé d'au moins 2 000 économistes, dont 6 prix Nobel, a rédigé une déclaration :

> *Les preuves sont là : l'influence de l'homme sur le climat de la planète est visible. En tant qu'économistes, nous pensons que le changement climatique mondial est porteur de risques environnementaux, économiques, sociaux et géopolitiques importants et que des mesures préventives se justifient*[89].

L'une des raisons qui poussent les économistes à se préoccuper de plus en plus de l'environnement est sans doute que l'on observe, depuis 1985 environ, une fâcheuse tendance à la hausse des pertes économiques mesurables dues à des catastrophes climatiques (figure 3-25).

Aucune des observations ci-dessus ne *prouve* que le changement climatique actuel a des causes anthropiques. Et quand bien même il en aurait, son impact sur l'activité humaine et les écosystèmes du futur ne peut être prédit avec certitude. Certains se sont emparés de cette incertitude pour semer la confusion[90], c'est

---

88. WWF, *Rapport « Planète Vivante » 1999*, Gland, Suisse, WWF, 1999.

89. R. T. Watson *et al., Bilan 2001 des changements climatiques : rapport de synthèse*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, GIEC, 2001. Également disponible, agrémenté de nombreuses illustrations, sur <www.ipcc.ch>.

90. Pour une présentation haute en couleur de l'opinion des sceptiques sur le climat et sur toutes les autres questions environnementales, voir Bjørn Lomborg, *op cit.*

FIGURE 3-25 – Pertes économiques dans le monde dues à des catastrophes climatiques

Les vingt dernières années du xxe siècle ont été marquées par une augmentation des pertes économiques dues à des catastrophes climatiques. **(Source : Worldwatch Institute)**

pourquoi il est important d'exposer clairement ce que nous savons. Nous faisons pour cela confiance aux centaines de scientifiques et de chercheurs qui constituent le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations Unies (GIEC), et qui rendent de prudentes conclusions tous les cinq ans environ[91] :

- Il est certain que les activités humaines, et plus particulièrement l'utilisation de combustibles fossiles et la déforestation, contribuent à la concentration dans l'atmosphère de gaz à effet de serre.
- Il est certain que la concentration de dioxyde de carbone (le premier des gaz à effet de serre) dans l'atmosphère augmente de façon exponentielle. Cette concentration est mesurée depuis des dizaines d'années. On peut effectuer un historique de la

91. Voir le site Internet extrêmement riche en informations de la Climatic Research Unit de l'Université de East Anglia, Norwich, Royaume-Uni, <www.cru.uea.ac.uk>.

concentration de CO_2 à partir des bulles d'air prisonnières des carottes de glace retirées des calottes glacières.

- Les gaz à effet de serre piègent la chaleur qui, autrement, s'échapperait de la Terre pour aller dans l'espace. C'est une propriété bien connue de leur structure moléculaire et de leurs fréquences d'absorption spectroscopique.
- La chaleur piégée élève la température de la Terre.
- Le réchauffement ne se répartira pas de façon égale, il sera plus fort aux pôles qu'à l'équateur. Comme les conditions météorologiques et le climat sur Terre sont en grande partie déterminés par les différences de température entre les pôles et l'équateur, les vents, les précipitations et les courants océaniques verront leur intensité et leur direction modifiées.
- Sur une terre plus chaude, les océans vont se dilater et le niveau des mers va monter. Si le réchauffement est suffisant pour faire fondre la glace polaire en grandes quantités, le niveau des mers va fortement augmenter, mais sur une échelle de temps plus longue.

Trois grandes incertitudes demeurent. La première concerne ce que les températures au niveau planétaire auraient été sans interférence humaine. S'il se trouve que les facteurs climatologiques à long terme, indépendamment de l'augmentation des gaz à effet de serre, font que la planète se réchauffe, alors ces derniers viendront accentuer le phénomène. La seconde incertitude concerne l'impact réel du réchauffement de la planète sur les températures, les vents, les courants, les précipitations, les écosystèmes et l'économie humaine selon les endroits du globe.

La troisième incertitude concerne les rétroactions. Les flux de carbone et d'énergie sur notre planète sont extrêmement complexes. Il se peut que des mécanismes d'autocorrection, des boucles de rétroaction négatives se mettent en place et stabilisent les gaz à effet de serre ou la température. L'un d'eux est déjà à l'œuvre : les océans absorbent en effet environ la moitié des excès d'émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Cette action n'est pas

assez puissante pour stopper l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2, mais elle est suffisante pour la ralentir.

Il se peut aussi qu'on observe des boucles de rétroaction positives qui aient un effet déstabilisateur et qui, à mesure que la température augmentera, aggraveront le réchauffement. Ainsi, comme petit à petit le réchauffement fera baisser la couverture de neige et de glace, la Terre va renvoyer moins de rayonnements solaires, ce qui contribuera au réchauffement. La fonte des sols gelés de la toundra pourrait libérer de gigantesques quantités de méthane, un gaz à effet de serre qui va lui aussi contribuer au réchauffement de la planète et à la fonte des glaces et, au bout du compte, c'est encore plus de méthane qui sera libéré.

Personne ne sait comment vont interagir les possibles et nombreuses boucles de rétroaction positives et négatives face à l'augmentation des gaz à effet de serre, ni ce qui, du positif ou du négatif, l'emportera. Fort heureusement, on a assisté dans les années 1990 à une extraordinaire multiplication des études scientifiques sur ce sujet et les simulations par ordinateur font des progrès constants dans les prévisions des probables effets climatiques[92]. Le « bulletin météo pour 2050 » qui en a résulté est suffisamment inquiétant pour avoir attiré l'attention du grand public.

> *La question n'est pas de savoir si le climat sera davantage affecté à l'avenir par les activités humaines, mais plutôt* dans quelle mesure *(ampleur),* où *(phénomènes régionaux) et* quand *(vitesse du changement). Il est également évident que le changement climatique aura, dans de nombreuses régions du monde, des répercussions négatives sur les secteurs socio-économiques, parmi lesquels les ressources en eau, l'agriculture, la foresterie, les pêcheries, les peuplements humains, les écosystèmes (particulièrement les récifs coralliens) et la santé humaine (particulièrement les maladies vectorielles). Le Troisième Rapport d'évaluation du GIEC en a donc conclu que la*

92. Voir, par exemple, « Global Warming. Stormy Weather », *Time*, 13 novembre 2000, qui comporte des prévisions météorologiques par région en Europe jusqu'en 2050.

majorité des hommes allaient subir le préjudice du changement climatique[93].

Les scientifiques savent qu'il y a déjà eu des bouleversements de température sur Terre par le passé et que ces bouleversements ne se sont pas autocorrigés rapidement, qu'ils ne se sont pas fait en douceur et qu'ils n'ont pas été réguliers. Bien au contraire, ils sont survenus de façon chaotique. La figure 3-26 montre un historique sur 160 000 ans des températures sur Terre et de la concentration atmosphérique de deux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone et le méthane[94]. Les températures et ces deux gaz ont tous enregistré des variations sans qu'on sache précisément lequel des trois est à l'origine de ces variations. Très probablement, il y a des liens de cause à effet qui s'expliquent par une série de boucles de rétroaction complexes.

Mais le principal message de la figure 3-26 est que la concentration atmosphérique *actuelle* en dioxyde de carbone et en méthane est *beaucoup plus élevée qu'elle ne l'a jamais été depuis 160 000 ans.* Et quelles qu'en soient les conséquences, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre remplissent actuellement beaucoup trop vite les exutoires atmosphériques pour que la planète ait le temps de les vider. Cela provoque donc un important déséquilibre dans l'atmosphère de la Terre et cette situation empire à un rythme exponentiel.

Le processus mis en branle par ce déséquilibre évoluera peut-être lentement à l'échelle du temps humain. Il faudra peut-être des dizaines d'années avant que les conséquences ne se fassent sentir à travers la fonte des glaces, l'élévation du niveau des mers,

93. R. T. Watson *et al., Bilan 2001 des changements climatiques*, *op. cit.*.

94. Ces données proviennent de carottages très profonds effectués dans la calotte glacière antarctique. En effet, la glace polaire s'y accumule depuis des milliers d'années, couche après couche, et chacune de ces couches a pris au piège de minuscules bulles d'air qui peuvent dater de l'époque préhistorique. L'analyse isotopique permet de dater les couches et nous renseigne sur les températures qu'il y a eu par le passé ; une analyse directe des bulles d'air révèle la concentration en dioxyde de carbone et en méthane.

le changement des courants et des précipitations, l'intensification des orages ou la migration d'insectes, d'oiseaux ou de mammifères. Mais il est également possible que le climat change brusquement à la faveur de boucles de rétroactions positives que nous ne comprenons pas encore. Voici ce qu'un comité de la National Academy of Sciences [Académie américaine des sciences] écrivait en 2002 :

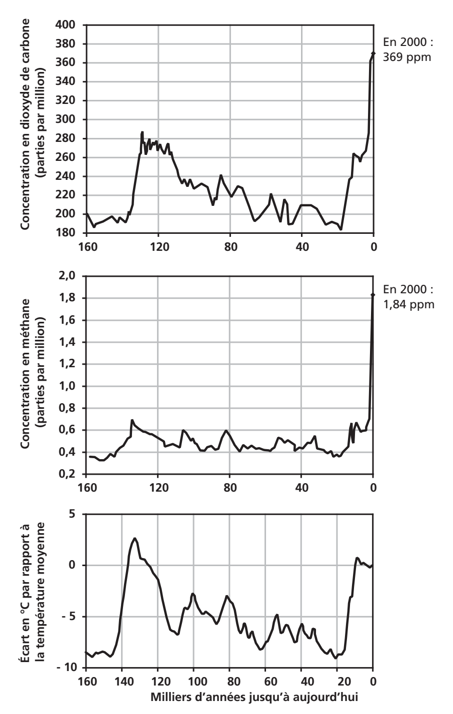
> *Des données scientifiques récentes montrent que des changements climatiques importants et de grande ampleur se produisent à une vitesse alarmante. Ainsi, la moitié environ du réchauffement de l'Atlantique nord depuis la dernière période glaciaire s'est produite en une dizaine d'années seulement, et il s'est accompagné de changements climatiques notables affectant la majeure partie du globe… On ne parvient toujours pas à expliquer entièrement les changements soudains du passé*[95].

Il faudra des siècles et peut-être même des millénaires pour remédier aux conséquences néfastes, qu'elles surviennent rapidement ou lentement.

Les impacts environnementaux négatifs de l'activité humaine que nous avons passés en revue dans ce chapitre n'allaient pas de soi. Ils étaient évitables. La pollution est de moins en moins perçue comme un signe de progrès, mais comme un signe d'inefficience et de négligence. À mesure que les industries prennent conscience de cela, elles parviennent rapidement à trouver des moyens de réduire leurs émissions et leur utilisation de ressources en repensant entièrement les procédés de fabrication, en abandonnant les solutions « en fin de cycle » (réduction des émissions des processus de production qui sont en place) pour une « production plus propre » (conception de produits et de processus de production qui rejettent moins d'émissions et utilisent moins de ressources) et pour « l'écologie industrielle » (utilisation des résidus de production d'une usine comme matière première

95. Committee on Abrupt Climate Change, *Abrupt Climate Change – Inevitable Surprises*, Washington, DC, National Academy Press, 2002.

FIGURE 3-26 – Gaz à effet de serre et températures de la planète au cours des 160 000 dernières années



Les mesures effectuées sur les carottes de glace montrent qu'il y a eu d'importantes variations de température sur Terre (périodes glaciaires et interglaciaires) et que les taux de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère ont varié en même temps que la température mondiale. Les concentrations de ces gaz à effet de serre ont récemment atteint un niveau bien supérieur à ce qu'elles ont toujours connu avant l'apparition de l'humain. **(Source : CDIAC)**

par une autre usine). Ainsi, un fabricant de circuits imprimés qui investit dans des colonnes échangeuses d'ions pour récupérer des déchets de métaux lourds tire un revenu des métaux recyclés, obtient une facture d'eau nettement plus basse et souscrit une assurance-responsabilité moins coûteuse. Une entreprise industrielle réduit ses émissions de polluants de l'air et de l'eau, ses

besoins en eau et sa production de déchets solides et économise des centaines de millions par an en charges d'exploitation. Enfin, une entreprise chimique qui décide de réduire ses émissions de CO_2 pour éviter de payer une amende fait dans le même temps de colossales économies en coûts énergétiques.

Une grande partie de ces démarches se sont avérées rentables, même à court terme, et il faut ajouter à cela l'impact positif sur les relations publiques qui accompagne de tels changements. Nul doute que les avantages économiques constitueront un argument de poids dans la poursuite de la baisse de l'empreinte écologique par unité de consommation.

Si la durée de vie moyenne de chaque produit circulant dans l'économie humaine pouvait être multipliée par deux, si on pouvait recycler deux fois plus de matériaux, si on avait besoin de mobiliser moitié moins de matière pour fabriquer un produit, on pourrait diviser le flux de matière par huit[96]. Si l'utilisation de l'énergie était plus efficiente, si on utilisait davantage les énergies renouvelables, si la terre, le bois, la nourriture et l'eau faisaient l'objet de moins de gaspillage et si les forêts étaient restaurées, cela stopperait l'augmentation des gaz à effet de serre et de nombreux autres polluants.

Au-delà des limites

> *Une rapide évaluation… montre que l'appropriation actuelle des ressources et des services naturels dépasse déjà la capacité de charge à long terme de la Terre… Si tout le monde avait les mêmes repères écologiques que les Nord-Américains, nous aurions besoin de trois planètes pour satisfaire notre demande matérielle totale en utilisant la technologie actuelle… Pour répondre durablement aux besoins de la population et de la production économique, qui vont toutes deux*

---

96. Ces perspectives prometteuses sont explorées en profondeur par Ernst von Weizsäcker, Amory Lovins et L. Hunter Lovins dans *Facteur 4 : deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources*, Mens, Terre vivante, 1997.

augmenter durant les 40 prochaines années, il nous faudrait entre 6 et 12 planètes supplémentaires.

– Mathis Wackernagel et William Rees, 1996

Les preuves que nous avons fournies dans ce chapitre, auxquelles s'ajoutent toutes celles que l'on peut trouver dans les bases de données internationales et celles que les médias apportent quotidiennement, montrent toutes que l'économie humaine n'utilise pas les stocks et les exutoires de la planète de façon durable. Sols, forêts, eaux de surface, nappes souterraines, zones humides, atmosphère et biodiversité sont dégradés. Même dans les zones où le stock de ressources renouvelables semble stable, comme les forêts d'Amérique du Nord ou les sols d'Europe, la qualité, la diversité ou la bonne santé des stocks ne sont pas garanties. Les substances polluantes s'accumulent, et font déborder les exutoires. La composition chimique de l'atmosphère tout entière est modifiée au point que les perturbations climatiques qui en découlent sont d'ores et déjà mesurables.

Vivre du capital et non des revenus

Si un ou quelques stocks seulement de ressources diminuaient tandis que d'autres restaient stables ou augmentaient, on pourrait soutenir que la croissance au sens classique du terme peut se poursuivre pour peu que l'on remplace certaines ressources par d'autres (même s'il y a des limites à ce genre de permutations). Si un petit nombre seulement d'exutoires se remplissaient, les humains pourraient en remplacer un (par exemple l'océan) par un autre (par exemple l'air). Mais étant donné que de nombreux exutoires se remplissent et que de nombreux stocks s'amenuisent, et que l'empreinte écologique des humains a dépassé le niveau soutenable, nous devons procéder à un changement plus radical.

Ne nous méprenons pas : les limites existantes ne portent pas sur le niveau d'activité économique des humains tel que mesuré par le PNB mondial. Les limites existantes restreignent l'empreinte écologique de l'activité humaine. Et il ne s'agit pas de

limites absolues à court terme. Les dépasser n'équivaut pas à se précipiter de façon inexorable contre un mur. L'analogie la plus simple que l'on puisse trouver à cet égard est celle des pêcheries classiques dont les prises peuvent chaque année excéder la reconstitution annuelle des stocks pendant une certaine période… jusqu'à ce que le stock de poissons ait été entièrement décimé. De la même façon, les émissions de gaz à effet de serre peuvent continuer à augmenter pendant un certain temps, y compris une fois les limites durables dépassées, avant que des réactions négatives se traduisant par le changement climatique n'obligent ces émissions à baisser. Mais, après le dépassement des limites, les flux devront de toute façon diminuer, soit grâce à une décision humaine, soit à cause des limites imposées par la nature.

De nombreux individus constatent au niveau local que l'empreinte des humains a dépassé les limites acceptables. La ville de Jakarta émet ainsi plus de pollution que les poumons de ses habitants ne peuvent en supporter. Les forêts des Philippines ont presque entièrement disparu. Par endroits, le sol en Haïti est tellement épuisé qu'il n'est plus que roches nues. Les pêcheries de morue à Terre-Neuve ont fermé. Les Parisiens doivent réduire leur vitesse certains jours d'été pour limiter la pollution qui s'échappe des pots d'échappement de leurs voitures. Plusieurs pays européens ont déploré la mort de milliers de personnes lorsque, à l'été 2003, de nouveaux records de chaleur ont été enregistrés. La pollution chimique du Rhin a été telle pendant de nombreuses années que la vase draguée dans les ports néerlandais est aujourd'hui considérée comme un déchet dangereux. Quant aux skieurs qui se sont rendus à Oslo à l'hiver 2001, ils ont eu bien du mal à trouver de la neige.

Pour certains problèmes bien spécifiques, comme celui des CFC qui attaquent la couche d'ozone, il y a non seulement eu prise de conscience du dépassement des limites, mais également de réels efforts au niveau mondial pour prendre des mesures correctives. La communauté internationale s'emploie toujours à limiter les gaz à effet de serre, même si elle est régulièrement

confrontée à l'égoïsme et à la myopie de certains États représentant des bailleurs tout aussi égoïstes et myopes qu'eux. Le processus de Kyoto est l'illustration parfaite de la difficulté qu'il y a à faire machine arrière, une fois les limites dépassées.

Il y a néanmoins peu de débats sur le *problème général* du dépassement, peu de pression en faveur des changements techniques qui s'imposent de toute urgence pour rendre les flux plus efficients, et quasiment aucune volonté de s'attaquer aux forces motrices de la croissance démographique et économique. Ce déficit d'attention pouvait sans doute être excusé en 1987, car alors, même les groupes informés comme la Commission mondiale de l'environnement et du développement, qui surveillait de près les tendances mondiales et les qualifiait de « simplement non soutenables », n'ont pas estimé politiquement opportun de déclarer que *la société humaine avait dépassé ses limites*, et encore moins de se poser sérieusement la question de ce qu'il fallait faire. Sans doute parce qu'ils ne croyaient pas à la véracité des faits. Mais aujourd'hui, en ce début de XXIe siècle, il est inexcusable de nier la terrible réalité du dépassement des limites et de fermer les yeux sur ses conséquences.

Les raisons qui poussent à éluder la question du dépassement sont compréhensibles et politiques. Dès que l'on parle de réduire la croissance, on se heurte à de cinglantes remarques sur la répartition des ressources disponibles et des responsabilités à endosser vis-à-vis de la situation actuelle. D'une façon générale, l'empreinte écologique d'une personne riche est bien plus élevée que celle d'une personne pauvre. On dit ainsi qu'un Allemand a une empreinte 10 fois plus élevée qu'un Mozambicain, tandis qu'un Russe puise autant de ressources dans les stocks planétaires qu'un Allemand, mais sans même en retirer un niveau de vie décent. Si c'est le monde dans son ensemble qui dépasse les limites, qui doit prendre des mesures ? Les riches gaspilleurs, les pauvres qui se multiplient ou les ex-communistes inefficients ? Du point de vue de la planète, ce sont les trois à la fois.

> *L'état de pauvreté que connaît encore la majorité des habitants de la planète, et la consommation excessive qui caractérise une minorité d'entre eux sont les deux principales causes de la dégradation de l'environnement. Notre façon de faire actuelle n'est pas soutenable et nous ne pouvons plus choisir de procrastiner*[97].

Les spécialistes de l'environnement résument parfois les causes de la dégradation environnementale par une formule appelée IPAT :

Impact = Population x Abondance x Technologie

L'impact (empreinte écologique) de toute population ou de tout pays sur les sources et les exutoires de la planète est égal au produit de la population (P) par son niveau de consommation ou « abondance » (A) et par les dégâts causés par les technologies (T) choisies pour satisfaire ce niveau. Afin de réduire l'empreinte écologique de l'humanité, il semble raisonnable que chaque pays s'efforce de progresser dans les secteurs où il a le plus de possibilités de le faire. Pour les pays en développement, il s'agit de la population, pour les pays occidentaux, de l'abondance, et pour les pays d'Europe de l'Est, de la technologie.

Les possibilités d'amélioration sont considérables. Quand on définit chaque terme de l'équation IPAT de façon plus précise, on constate à quel point les moyens de réduire l'empreinte écologique sont nombreux et l'ampleur que ces réductions peuvent prendre (voir tableau 3-3)[98].

L'abondance est déterminée par un niveau élevé de consommation, par exemple par le nombre d'heures passées soit devant la télévision, soit à conduire une voiture, soit à se reposer dans une pièce. L'empreinte écologique de l'abondance est l'impact ou le *flux* généré par la matière, l'énergie et les émissions liées à cette consommation. Ainsi, si on boit trois cafés par jour, l'empreinte

---

97. PNUE, *L'avenir de l'environnement mondial 2000*, Bruxelles, De Boeck, 2000.

98. Nous nous sommes inspirés pour cette formulation de celle énoncée en premier lieu par Amory Lovins.

sera très différente selon que l'on utilise de la porcelaine classique ou des tasses en plastique. Pour entretenir de la porcelaine, il faut de l'eau et du liquide vaisselle pour la laver et un petit nombre de tasses supplémentaires pour remplacer celles que l'on casse tous les ans. En revanche, quand on utilise et qu'on jette des tasses en polystyrène, l'entretien inclut toutes les tasses utilisées sur une année, le pétrole et les produits chimiques nécessaires à la fabrication du polystyrène, ainsi que le transport des tasses jusqu'à leur lieu d'utilisation.

L'impact de la technologie est défini dans le tableau 3-3 comme l'énergie nécessaire pour fabriquer et fournir chaque flux de matière multipliée par l'impact sur l'environnement par unité d'énergie. Il faut de l'énergie pour extraire l'argile destinée aux tasses en céramique, brûler cette argile, apporter les tasses à la personne qui les a choisies et chauffer l'eau qui va servir à les laver. Il faut également de l'énergie pour trouver et pomper le pétrole des tasses en polystyrène, le transporter, faire fonctionner la raffinerie, polymériser le styrène, mouler les tasses, les livrer, puis transporter celles qui ont servi aux ordures. Chaque type d'énergie entraîne son propre impact environnemental. L'empreinte écologique peut être modifiée sur le plan technologique grâce à des dispositifs de contrôle de la pollution, à une plus grande efficacité énergétique ou au passage à une autre source d'énergie.

La modification de n'importe quel facteur du tableau 3-3 entraîne celle de l'empreinte écologique et rapproche ou au contraire éloigne l'économie humaine des frontières planétaires. En limitant la population ou le stock de matière accumulé par chacun d'entre nous, on contribue à maintenir l'humanité au sein des limites de la planète, de même que si l'on atteint une plus grande éco-efficience, c'est-à-dire si l'on réduit l'utilisation d'énergie et de matière et que l'on rejette moins d'émissions par unité de consommation. Le tableau indique certains des outils qui peuvent servir à réduire chaque terme de l'équation et formule des hypothèses sur l'ampleur avec laquelle ils peuvent être réduits et le temps nécessaire pour ce faire.

TABLEAU 3-3 – L'impact environnemental de la population, de l'abondance et de la technologie

Population	Abondance		Technologie	
Population	x stock de capital / personne	x flux de matière / stock de capital	x énergie / flux de matière	x impact environnemental / stock de capital
Exemple				
Population	x tasses / personne	x eau + liquide vaisselle / stock de capital	x gigajoules ou kilowattheures / kilogramme d'eau + liquide vaisselle	x CO_2, NO_x et utilisation de la terre / gigajoules ou kilowattheures
Outils applicables				
Planning familial	Valeurs	Longévité de la production	Efficience de l'utilisation finale	Sources non nocives
Alphabétisation des femmes	Prix	Choix de la matière	Efficience de conversion	Choix de l'échelle
Bien-être collectif	Établissement du prix de revient	Conception à partir d'un minimum	Efficience de la répartition	Choix du site
Rôle des femmes	Que voulons-nous ?	Recycler, réutiliser	Intégration des systèmes	Atténuation technique
Régime foncier	Qu'est-ce qui est suffisant	Récupération des déchets	Reconceptualisation des processus	Compensations
Ampleur approximative du changement à long terme				
~2 x	?	~3-10 x	~5-10 x	~10^2-10^{3+} x
Échelle de temps des changements majeurs				
~50-100 ans	~0-50 ans	~0-20 ans	~0-30 ans	~0-50 ans

Présenté de cette façon, il est clair qu'il existe de nombreuses possibilités. L'impact de l'humain sur les sources et les exutoires de la planète peut être réduit de façon considérable. Car même en tablant sur des avancées minimales dans chaque secteur où le changement est possible, pris tous ensemble, ces changements peuvent réduire l'impact de l'humain sur la planète d'un facteur de *plusieurs centaines voire plus.*

S'il y a autant de possibilités, pourquoi ne nous donnons-nous pas la peine d'en exploiter au moins une ? Et si nous le faisions ?

Que se passerait-il si les tendances en matière de population, d'abondance et de technologie s'inversaient ? Comment ces tendances sont-elles reliées entre elles ? Que se passerait-il si l'empreinte écologique était réduite grâce au changement technique, mais que la population et le capital continuaient à croître ? Et que se passerait-il si l'empreinte écologique restait inchangée ?

Ces questions ne portent pas sur les stocks de ressources et les exutoires de pollution pris séparément, comme nous venons de le faire dans ce chapitre, mais sur l'empreinte écologique dans son ensemble et ses interactions avec la population et le capital, ceux-ci étant eux-mêmes en interaction. Pour répondre à ces questions, nous devons donc abandonner toute analyse statique portant sur un facteur à la fois pour adopter une analyse dynamique du système tout entier.

CHAPITRE 4

World 3 : la dynamique de la croissance dans un monde fini

Si les prévisions actuelles relatives à la croissance démographique se vérifient et que les modalités de l'activité humaine sur la planète ne changent pas, la science ni la technologie ne pourront peut-être pas empêcher une dégradation irréversible de l'environnement ni permettre d'éradiquer la pauvreté sur une grande partie du globe.

– Royal Society of London et National Academy of Sciences, 1992

Les facteurs responsables de la croissance démographique et industrielle sont liés à de nombreuses tendances à long terme qui s'accentuent et entrent en conflit les unes avec les autres. Ainsi, les taux de natalité baissent plus vite que prévu, mais la population continue à augmenter. Beaucoup d'individus s'enrichissent et exigent davantage de produits industriels, mais ils veulent également moins de pollution. Les flux de matière et d'énergie nécessaires à la croissance industrielle font baisser les stocks de ressources non renouvelables et détériorent les ressources renouvelables. Mais nous progressons régulièrement dans la mise au point de technologies qui nous permettent de découvrir de nouvelles réserves et d'utiliser la matière de façon plus

efficiente. Tous les pays doivent faire face à une pénurie de capitaux, car il faut investir pour trouver plus de ressources, produire plus d'énergie, remédier à la pollution et améliorer les écoles, les soins de santé et autres services proposés à la société. Mais ces investissements entrent en concurrence avec une demande de biens de consommation en constante augmentation.

Comment toutes ces tendances vont-elles interagir et évoluer au cours des décennies à venir ? Pour comprendre le rôle qu'elles jouent, nous avons besoin d'un modèle bien plus complexe que celui de notre cerveau. Voilà pourquoi ce chapitre traite de World3, le modèle informatique que nous avons conçu et utilisé. Nous allons résumer les principales caractéristiques de la structure de ce modèle et livrer plusieurs aperçus importants qu'il nous donne du XXIe siècle.

L'objectif et la structure de World3

Chacun a besoin d'avoir des certitudes quant à l'avenir, et ce besoin peut entraîner des malentendus et des frustrations lorsqu'on présente un modèle qui peut servir de point de départ pour envisager cet avenir. Nous sommes confrontés à ce problème depuis que nous avons publié la première édition de cet ouvrage, il y a plus de 30 ans. Tirée d'un grand classique de la littérature de science-fiction, une conversation entre un modélisateur du nom de Seldon et son empereur illustre ce problème :

> *« On me dit que tu crois possible de prédire l'avenir. »*
> *Seldon éprouva soudain de la lassitude. Il se sentait condamné à cette interprétation erronée de sa théorie. Il n'aurait peut-être pas dû présenter son article.*
> *Il dit : « Pas vraiment, en fait. Ce que j'ai fait est beaucoup plus limité que cela… Ce que j'ai fait… c'est montrer… qu'il est possible de partir d'un point donné et de faire des hypothèses pertinentes qui permettront d'éviter le chaos. Qui permettront de prédire l'avenir, pas de façon très précise, bien sûr, mais dans les grandes lignes ; pas avec certitude… »*

L'Empereur, qui l'avait écouté attentivement, répondit : « Mais est-ce que cela ne signifie pas que tu sais comment prédire l'avenir ?[1] »

Tout au long de la suite de cet ouvrage, nous allons souvent nous servir de World3 pour produire des scénarios qui vont nous aider à évoquer l'avenir dans ses « grandes lignes ». Mais afin d'éviter au maximum toute confusion concernant nos objectifs, nous allons commencer par formuler plusieurs définitions et avertissements au sujet des modèles informatiques.

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité. Si c'en était une reproduction exacte, cela n'aurait aucune utilité. Ainsi, une carte routière n'aiderait pas un conducteur si elle montrait chaque détail de la zone qu'elle couvre ; elle s'attache donc à représenter les routes et fait l'impasse sur la plupart des bâtiments et des usines qui les bordent. Une petite maquette d'avion peut être utile pour étudier la dynamique d'une surface portante particulière dans une soufflerie, mais elle ne donnera aucun renseignement sur le confort des passagers lorsque l'avion sera mis en service. Une peinture est une représentation graphique qui peut exprimer un certain état d'esprit ou montrer l'emplacement physique des composantes d'un paysage, mais elle ne donne aucune information sur le coût ou l'isolation des bâtiments qu'elle représente. Pour ce faire, il faudrait avoir recours à un modèle graphique différent : le plan de construction d'un architecte, par exemple. Les modèles étant toujours des simplifications, ils ne sont jamais totalement fiables et ne détiennent pas la vérité.

La raison d'être d'un modèle est de servir un objectif bien précis, de répondre à des questions bien particulières qui ont un lien entre elles. Il faut donc garder présentes à l'esprit les limites du modèle et les questions auxquelles il ne répondra pas. Nous nous sommes efforcés de rendre World3 utile pour un ensemble de questions délimitées avec précision concernant la croissance physique à long terme sur notre planète. Cela signifie malheureu-

1. Isaac Asimov, *Prélude à Fondation*, Paris, Presses de la Cité, 1989.

sement que World3 n'apportera pas de réponse à la plupart des questions qui vous concernent directement.

Les modèles prennent différentes formes, les plus courantes étant mentales, verbales, graphiques, mathématiques ou physiques. De nombreux termes dans cet ouvrage sont ainsi des modèles verbaux. La *croissance*, la *population*, la *forêt* et l'*eau* ne sont que des symboles, de simples représentations verbales de réalités très complexes. N'importe quel tableau, courbe, carte ou photographie est un modèle graphique dont les liens sont exprimés à travers l'apparence et l'emplacement des éléments sur le papier. World3 est un modèle mathématique. Les liens qu'il contient sont représentés par une série d'équations. Nous n'avons pas utilisé de modèle physique dans notre démarche destinée à comprendre la croissance et ses limites, mais ils sont très utiles à bien des égards, notamment pour concevoir des communautés ou des produits industriels.

Les modèles mentaux sont les abstractions que produit notre cerveau. Ils ne sont pas directement accessibles aux autres et sont informels. Les modèles formels, en revanche, sont directement visualisables par les autres et peuvent parfois même être manipulés. Dans l'idéal, ces deux types de modèles doivent interagir. Grâce aux modèles formels, nous pouvons en savoir davantage sur la réalité et sur les modèles mentaux des autres, ce qui enrichit nos propres modèles mentaux. Et à mesure que nous apprenons, nous devenons capables de créer davantage de modèles formels utiles. C'est dans ce processus itératif que nous nous sommes lancés il y a plus de 30 ans, et ce livre en est le résultat.

Pour le créer, nous avons assemblé des mots, des données, des graphiques et des scénarios informatiques. Ce livre est un modèle de ce qu'il y a dans nos têtes et sa création a modifié ce que nous savons. Il est notre tentative la plus aboutie de symboliser nos réflexions actuelles et notre compréhension de la croissance physique sur cette planète durant le siècle à venir. Mais ce livre n'est qu'un modèle de nos réflexions qui, à l'instar des réflexions de quiconque, ne sont elles-mêmes que des modèles du « monde réel ».

C'est pourquoi nous sommes confrontés à une difficulté. Nous allons parler d'un modèle formel, d'une simulation informatique du monde. Pour que ce modèle ait une quelconque utilité, nous allons devoir le comparer au « monde réel », mais ni vous, lecteurs, ni nous n'avons une vision commune de ce « monde réel ». Chacun de nous n'a que ses propres modèles mentaux de cette entité qu'on appelle communément le monde réel. Or les modèles mentaux du monde qui nous entoure sont le fruit de constatations objectives et d'expériences subjectives. Ils ont certes permis à *Homo sapiens* d'être une espèce qui a connu un parcours exceptionnel, mais ils ont aussi causé beaucoup de torts aux individus. Quelles que soient leurs forces et leurs faiblesses, les modèles mentaux humains n'en restent pas moins ridiculement simples comparés à l'univers immense, complexe et en constante évolution qu'ils tentent de représenter.

Afin que nous gardions tous présente à l'esprit notre inéluctable dépendance vis-à-vis des modèles, nous mettrons systématiquement la référence qui a servi de modèle à World3, le « monde réel », entre guillemets. Ce que nous entendons par « *monde réel* » ou « *réalité* » n'est autre que le modèle mental que les auteurs de ce livre partagent. Le terme « *réalité* » ne renvoie jamais à autre chose qu'au modèle mental de la personne qui l'emploie. C'est ainsi. La seule chose que nous pouvons affirmer est qu'au cours de l'exercice qu'a représenté le travail avec notre modèle informatique, nos modèles mentaux ont été contraints à être plus rigoureux, plus complets et plus clairs qu'ils ne l'étaient jusque-là. C'est là l'avantage des modèles informatiques : ils vous obligent à une certaine discipline, à une certaine logique et à une rigueur comptable auxquelles il est difficile de parvenir à l'aide des seuls modèles mentaux. Ils fournissent en outre une base beaucoup plus utile pour améliorer ces derniers.

World3 a beau être complexe, sa structure fondamentale n'est pas difficile à comprendre. Il suit l'évolution de stocks tels que la population, le capital industriel, la pollution persistante et les terres cultivées. Dans ce modèle, les stocks évoluent en fonction

de flux comme celui des naissances et des décès (dans le cas de la population), des investissements et de la dépréciation (pour chaque stock de capital), des émissions de pollution et de leur neutralisation (pollution persistante) et (dans le cas des terres arables) de l'érosion des sols, de l'amélioration des terres et des terres supprimées au profit d'usages urbains ou industriels. Seule une fraction des terres arables est cultivée. En multipliant la surface de terres cultivées par leur rendement moyen, on obtient la production totale de nourriture. Celle-ci, divisée par la population, donne la quantité de nourriture par habitant. Si cette dernière tombe en dessous d'un seuil critique, le taux de mortalité se met à augmenter.

Les composantes et les liens au sein de World3 sont simples lorsqu'on n'en observe qu'un à la fois. Ainsi, World3 prend en compte la dynamique de la croissance démographique, l'accumulation de la pollution, la longue durée de vie du capital industriel, la concurrence pour l'investissement entre différents secteurs. Il s'attache au temps qu'il faut pour que les phénomènes se produisent, aux retards dans les flux et au lent déploiement des processus physiques. Il comprend plusieurs dizaines de boucles de rétroaction. Ces boucles sont des chaînes de causalité fermées au sein desquelles un élément constitue souvent la cause partielle de son propre comportement à venir. Un changement démographique peut par exemple entraîner un changement économique et le résultat économique étant modifié, cela a des répercussions sur les taux de natalité et de mortalité, répercussions qui vont ensuite modifier davantage encore la situation démographique. Les boucles de rétroaction sont l'une des caractéristiques de World3 qui le rendent complexe sur le plan dynamique.

Une autre caractéristique de ce modèle sont ses nombreuses relations *non linéaires*. Ce type de relation ne peut pas se traduire par des lignes droites, car il ne modifie pas de façon proportionnelle tous les types de variables qui lui sont liées. Supposons qu'A influence B. Dans une relation linéaire, si le fait de multiplier A par 2 provoque la multiplication de B par 2, on peut en conclure

FIGURE 4-1 – Nutrition et espérance de vie

L'espérance de vie d'une population est une fonction non linéaire des calories qu'elle reçoit. Chaque point sur ce graphique représente l'espérance de vie et le niveau nutritionnel moyens d'un pays en 1999. Le niveau nutritionnel est exprimé en calories équivalent végétal par personne et par jour ; les calories obtenues de sources animales sont multipliées par 7 (puisqu'il faut environ 7 calories de nourriture végétale pour produire une calorie d'origine animale). **(Sources : FAO ; UN)**

que diviser A par 2 va réduire B de 50 %. Et multiplier A par 5 va aussi multiplier B par 5. Les relations linéaires ont tendance à produire des comportements relativement faciles à comprendre. Mais la linéarité est rare dans le « monde réel ». Ainsi, dans World3, nous devons représenter l'influence de la quantité de nourriture par personne sur l'espérance de vie. La figure 4-1 nous montre un exemple de relation entre les deux. Des individus qui ne sont pas nourris correctement et qui reçoivent davantage de nourriture peuvent voir leur espérance de vie augmenter très nettement. Dans les pays qui sont parvenus à faire passer la consommation quotidienne de 2 000 à 4 000 calories équivalent végétal par personne et par jour, l'espérance de vie moyenne a augmenté de 50 %, passant de 40 à 60 ans. Mais si l'on multiplie à nouveau les calories par 2 pour atteindre 8 000, le gain en espérance de vie est assez faible : environ 10 ans de plus. Et à partir

d'un certain moment, l'augmentation de la consommation de nourriture peut au contraire faire baisser l'espérance de vie.

Des relations non linéaires comme celles-ci, on en rencontre partout dans le « monde réel » et donc dans World3. La figure 4-2 montre un exemple de relation de ce type utilisée dans notre modèle : le coût que représente l'exploitation de nouvelles terres agricoles par rapport à la surface de terres potentiellement arables restant inexploitées. Nous partons du principe que les premiers agriculteurs ont choisi les plaines les plus fertiles et les plus arrosées et se sont mis à les cultiver à peu de frais. C'est ce que l'on voit dans la partie la plus à droite de la courbe où 100 % ou presque des terres potentiellement arables sont encore inutilisées. Mais plus les terres sont exploitées à des fins agricoles (en allant vers la gauche de la courbe), plus les terres qui restent sont sèches, pentues, ont un sol peu profond ou bénéficient de températures peu clémentes. Le coût que représente la résolution de ces difficultés accroît le coût d'exploitation de la terre. Conformément au principe économique classique selon lequel les consommateurs choisissent d'abord les biens les moins chers, World3 émet l'hypothèse que les dernières terres à être cultivées vont coûter très cher, un coût qui va augmenter de façon non linéaire.

Un phénomène exerce une action sur un autre et produit un effet. Quand il exerce une action légèrement plus soutenue, au lieu de produire un effet proportionnellement plus soutenu, il ne se passe aucun changement ou bien un changement de bien plus grande ampleur ou encore un changement dans la direction opposée. Du fait de cette absence de linéarité, le « monde réel » tout comme World3 engendrent parfois des comportements surprenants, comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre.

Les temps de réaction intégrés par World3, les non-linéarités et les boucles de rétroaction le rendent complexe sur le plan dynamique, mais ce modèle présente néanmoins la réalité de façon très simplifiée. Il ne fait pas la distinction entre les différentes zones géographiques de la planète et ne représente pas séparément les riches et les pauvres. La pollution aussi est très

FIGURE 4-2 – Coûts d'exploitation de nouvelles terres agricoles

World3 part de l'hypothèse que le coût de la mise en exploitation de nouvelles terres agricoles augmente à mesure que la quantité de terres potentiellement arables diminue. **(Source : D. L. Meadows et al.)**

simplifiée. Les processus de production émettent ainsi plusieurs milliers de polluants différents, lesquels évoluent dans l'environnement à des vitesses différentes, touchant la faune et la flore de bien des façons. Mais World3 saisit l'influence de ces polluants grâce à deux variables agrégées seulement, l'une représentant la pollution de l'air de courte durée et l'autre, les matières toxiques à vie longue. Il fait la distinction entre les sources renouvelables qui produisent les aliments et les fibres et les sources non renouvelables qui produisent les combustibles fossiles et les minéraux, mais il ne suit pas chaque type d'aliment, chaque combustible, ni chaque minéral séparément. World3 ne tient pas compte des causes et des conséquences de la violence et ne représente pas de façon explicite le capital militaire ni la corruption.

Ce degré de simplicité surprend certaines personnes qui pensent qu'un modèle représentant le monde doit contenir tout ce que nous savons de la planète et en particulier toutes les distinctions qui sont à la fois si fascinantes et, du point de vue de chaque discipline universitaire, si essentielles. Mais l'intégration

de toutes ces distinctions ne rendrait pas le modèle meilleur pour autant et il deviendrait beaucoup plus difficile à appréhender. En dépit de sa relative simplicité, World3 est beaucoup plus exhaustif et complexe que bien des modèles utilisés pour élaborer des théories à long terme sur l'avenir de la planète.

Pour tenter de comprendre le comportement futur d'un système social, il faut un modèle qui soit équilibré. Cela n'a aucun sens de créer des modèles extrêmement détaillés dans certains domaines, tout en se cantonnant à de grossières hypothèses dans d'autres. Certains modèles démographiques suivent ainsi les deux sexes et traitent un grand nombre de classes d'âge dans de nombreux pays ou régions. Mais ils partent du principe que les taux de natalité et de mortalité vont suivre des voies prédéterminées indépendamment l'un de l'autre[2]. Certains modèles économiques couvrent des dizaines voire des centaines de secteurs économiques, mais n'envisagent que des relations linéaires entre les entrées et les sorties, réduisent les marchés à la simple loi de l'offre et de la demande ou estiment que les individus prennent des décisions uniquement sur la base d'une optimisation économique et qu'ils sont parfaitement informés pour ce faire.

Si le but d'un modèle est de fournir des informations utiles sur le comportement futur d'un système, il doit représenter de façon explicite les causes de toutes ses variables les plus importantes. Certains modèles utilisent des centaines d'équations pour représenter les influences qui pèsent sur une variable ou sur un secteur, mais laissent de côté d'autres variables telles que la consommation d'énergie ; ils considèrent en effet celle-ci comme une variable exogène mue par des facteurs extérieurs au modèle qui émanent de données historiques ou de l'intuition du modélisateur. Les modèles, à l'instar d'une chaîne en métal, peuvent être limités par leur maillon le plus faible. Nous nous sommes

2. On trouvera une illustration de cette approche dans Wolfgang Lutz (dir.), *The Future Population of the World: What Can We Assume Today?* (édition révisée et mise à jour), Londres, Earthscan, 1996.

donc efforcés de donner une égale importance à tous les secteurs de World3. Nous avons fait notre possible pour éviter de faire des hypothèses simplistes, d'oublier des facteurs décisifs et de rendre d'importantes variables dépendantes de contributions exogènes.

Mais vous n'êtes pas obligés de nous croire sur parole. Nous avons réalisé un CD-ROM de World3 qui contient le modèle et la documentation. Vous pouvez en obtenir une copie, reproduire tous nos scénarios, les comparer et évaluer notre interprétation à leur sujet[3].

L'objectif de World3

Les modélisateurs doivent se discipliner s'ils ne veulent pas créer d'impénétrables entrelacs d'hypothèses. Ils ne peuvent pas mettre tout ce qu'ils savent dans leurs modèles et doivent s'en tenir à *ce qui se justifie en fonction de l'objectif du modèle*. L'art de la modélisation, comme celui de la poésie, de l'architecture, de l'ingénierie ou de la cartographie, est de n'intégrer que ce qui est nécessaire pour atteindre l'objectif voulu. Pas davantage. C'est facile à dire, mais difficile à faire.

Voilà pourquoi, pour comprendre un modèle et pouvoir juger de son utilité, il est important de comprendre son objectif. Nous avons développé World3 pour comprendre l'avenir dans ses grandes lignes, c'est-à-dire les différents modes ou schémas comportementaux qui vont présider à l'interaction entre l'économie humaine et la capacité de charge de la planète durant le siècle à venir[4]. Nous aurions pu poser bien d'autres questions qui

---

3. Le CD contient un ordinogramme STELLA© de World3, le modèle entier du Scénario 1 et une interface grâce à laquelle vous pouvez reproduire et examiner les détails des 11 scénarios présents dans ce livre. Pour commander, rendez-vous sur <www.chelseagreen.com>.

4. Le concept de capacité de charge a été élaboré à l'origine pour des relations relativement simples entre populations et ressources. Il a par exemple été utilisé pour parler du nombre de têtes de bétail qui pouvaient rester sur un pâturage donné sans dégrader la terre. Le terme de capacité de charge devient beaucoup plus complexe s'agissant de populations humaines et aucune défini-

intéressent la planète sur le long terme : quelles politiques pourraient maximiser les possibilités de développement industriel de l'Afrique ? Comment concevoir au mieux un programme de planning familial dans une région où de nombreuses personnes sont analphabètes ? Comment les humains peuvent-ils réduire l'écart entre riches et pauvres à l'intérieur d'un pays et au niveau international ? Qui, du conflit ou de la négociation, va devenir le moyen privilégié pour résoudre les différends entre les pays ? Les facteurs et les liens nécessaires pour répondre à ces questions ne figurent généralement pas dans World3. D'autres modèles, y compris informatiques, pourraient apporter des réponses à certaines de ces questions. Mais s'ils veulent être utiles, ces modèles doivent prendre en compte les réponses que nous apportons à la question centrale posée par World3 : *comment la population mondiale et l'économie matérielle, toutes deux en plein essor, peuvent-elles interagir avec la capacité de charge limitée de la planète et s'y adapter durant les décennies à venir ?*

Pour être plus précis, la capacité de charge est en soi une limite. Toute population qui se développe au-delà de sa capacité de charge, dépassant la limite, n'a pas beaucoup d'avenir devant elle. Et quand une population est au-delà de sa capacité de charge, elle entame la capacité de soutien du système dont elle dépend. Si la régénération de l'environnement est possible, sa détérioration sera temporaire. Dans le cas contraire, ou si sa

---

tion n'est universellement admise. Les individus puisent toutes sortes de ressources dans l'environnement, ils produisent toutes sortes de déchets et leur impact sur l'environnement est lié à une grande variété de technologies, d'institutions et de styles de vie. Il n'y a pas d'accord sur la durée minimale durant laquelle un système doit persister pour être qualifié de durable. De même qu'il n'y en a pas non plus sur la façon dont on peut tenir compte des exigences des autres espèces. En tout état de cause, la capacité de charge est un concept dynamique. Nous utilisons le terme dans son acception la plus générale afin de désigner le nombre d'individus qui, dans des circonstances données, peuvent vivre sur la planète pendant une longue période – au moins plusieurs décennies – sans détériorer la productivité globale de cette planète. Voir Joel E. Cohen, *How Many People Can the Earth Support ?*, New York, W. W. Norton, 1995.

régénération nécessite plusieurs siècles, la détérioration sera bel et bien permanente.

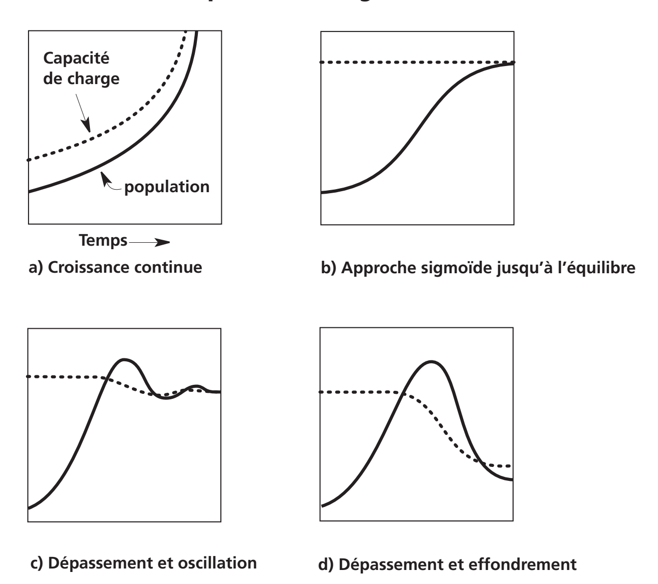
Une population croissante peut approcher sa capacité de charge de quatre grandes manières différentes (voir figure 4-3)[5]. Elle peut tout d'abord croître sans interruption tant que les limites restent éloignées ou qu'elles croissent plus vite que les individus. Elle peut ensuite se stabiliser doucement en dessous de sa capacité de charge selon un schéma de croissance que les écologistes appellent logistique, en forme de S ou sigmoïde, comme le montre la figure 4-3b. Aucune de ces deux solutions n'est plus possible pour la société mondiale actuelle puisqu'elle a déjà dépassé ses limites soutenables.

La troisième possibilité pour une population qui augmente est qu'elle dépasse sa capacité de charge sans provoquer de dégâts importants ni permanents. Dans ce cas, son empreinte écologique oscille autour de la limite avant de se stabiliser. Ce comportement, que montre la figure 4-3c, est appelé oscillation amortie. Quant à la quatrième possibilité, elle consiste à dépasser les limites en attaquant de façon soutenue et permanente le stock de ressources. Si cela devait se produire, la population et l'économie seraient contraintes de décliner rapidement pour équilibrer la capacité de charge qui aurait dégringolé. Nous utilisons l'expression « *dépassement et effondrement* » pour qualifier ce scénario, présenté par la figure 4-3d.

Il existe partout des preuves convaincantes que la société mondiale se situe désormais au-dessus de sa capacité de charge. Quelles politiques vont augmenter les chances d'un retour en douceur au-dessous des limites planétaires, c'est-à-dire d'une transition identique à celle de la figure 4-3c plutôt qu'à celle de la figure 4-3d ?

5. D'autres auteurs ont adopté cette catégorisation dans leurs réflexions au sujet de l'avenir. Voir par exemple William R. Caton, *Overshoot : The Ecological Basis of Revolutionary Change*, Chicago, University of Illinois Press, 1982.

FIGURE 4-3 – Possibles modes d'approche d'une population vis-à-vis de sa capacité de charge



La question centrale posée par World3 est la suivante : lequel de ces types de comportement est susceptible d'être adopté alors que la population humaine et l'économie s'approchent de la capacité de charge de la planète ?

Notre concept de « société mondiale » intègre tout à la fois les effets de la taille de la population et ceux de l'ampleur et de la nature de sa consommation. Pour l'exprimer, nous utilisons le terme d'« *empreinte écologique* » qui a été défini par Mathis Wackernagel et ses collègues[6]. Comme nous l'avons dit, l'empreinte écologique de l'humanité est la pression totale que les humains exercent sur la planète. Elle inclut l'impact de l'agriculture, de l'exploitation minière, de la pêche, de l'exploitation forestière, des émissions de polluants, de l'exploitation des terres

6. Mathis Wackernagel *et al.*, « Ecological Footprints of Nations : How Much Nature Do They Use ? How Much Nature Do They Have ? », *op. cit.*

et de la perte de biodiversité. L'empreinte écologique augmente quand la population fait de même, car elle augmente lorsque la consommation est en hausse. Mais elle peut aussi baisser quand des technologies adéquates sont employées pour réduire notre impact par unité d'activité humaine.

Nos préoccupations lors du développement de World3 peuvent être exprimées autrement. Sachant que l'empreinte écologique de la population mondiale se situe au-delà de la capacité de charge de la Terre, les politiques actuelles vont-elles nous conduire vers une oscillation relativement tranquille et ordonnée sans contraindre la population et l'économie à un déclin drastique ? Ou bien notre aventure en tant que société mondiale va-t-elle s'arrêter là ? Et si l'effondrement est l'issue la plus probable, quand va-t-il se produire ? Quelles politiques pourraient être mises en place dès maintenant pour réduire le rythme, l'ampleur et le coût social et écologique de ce déclin ?

Ce type de questions porte sur des éventualités comportementales très larges et non sur des conditions précises concernant l'avenir. Pour ces dernières, il faut un modèle différent qui livre des prévisions détaillées. Si vous lancez une balle en l'air, par exemple, vous avez suffisamment de connaissances pour savoir dans les grandes lignes quel va être son comportement. Elle va s'élever en l'air avec une vitesse décroissante, puis elle va prendre la direction inverse et retomber de plus en plus vite jusqu'à toucher le sol. Vous savez qu'elle ne va pas continuer à s'élever indéfiniment, ni se mettre en orbite autour de la Terre, ni faire trois tours avant de retomber.

Si vous vouliez prévoir avec exactitude jusqu'où la balle va monter ou bien où et quand elle va toucher le sol, vous auriez besoin d'informations précises sur l'objet en question, l'altitude, le vent, la force du lancer initial ainsi que sur certaines lois de la physique. De même, si nous voulions tenter de prévoir le nombre exact d'habitants dans le monde en 2026, annoncer la date du pic pétrolier ou encore donner le taux d'érosion des sols en 2070, nous aurions besoin d'un modèle bien plus compliqué que World3.

À notre connaissance, personne n'est parvenu à s'approcher d'un tel modèle et personne, selon nous, n'y parviendra. Il est tout simplement impossible de faire des prévisions précises sur l'état de la population, du capital et de l'environnement de la planète dans plusieurs dizaines d'années. Personne n'a suffisamment de connaissances pour cela et il y a de bonnes raisons de penser que personne n'en aura jamais. Le système de notre société mondiale est à la fois terriblement et magnifiquement complexe, et nombre de ses paramètres les plus importants n'ont toujours pas été mesurés. Certains ne sont sans doute pas mesurables. La compréhension que les humains ont des cycles écologiques complexes est très limitée. En outre, leur faculté à observer, à s'adapter, à apprendre, à faire des choix et à modifier leurs objectifs rend le système par essence imprévisible.

Lorsque nous avons construit notre modèle planétaire, ce n'était donc pas pour livrer des prévisions précises, mais pour comprendre dans les grandes lignes les tendances comportementales du système. Notre objectif est d'informer et d'influencer les choix des humains et, pour ce faire, nous n'avons pas besoin de prévoir l'avenir dans les détails. Nous devons nous contenter d'identifier les politiques qui augmenteront les chances pour le système d'avoir un comportement soutenable et qui atténueront la gravité de l'effondrement futur. La prévision d'une catastrophe devant un public sensé et actif doit, dans l'idéal, ne pas aboutir ou se révéler fausse, en induisant l'action qui va l'empêcher de se produire. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi de nous attacher aux schémas plutôt qu'aux chiffres isolés. Et nous espérons, avec World3, livrer une prophétie qui ne se réalisera pas.

Pour atteindre notre objectif, nous avons rentré dans World3 le type d'informations dont on pourrait avoir besoin pour comprendre les tendances comportementales d'une balle qu'on aurait lancée (ou d'une économie et d'une population qui se développent), et non celles qui seraient nécessaires pour décrire l'exacte trajectoire du lancer d'une balle en particulier.

Nous nous intéressons aux changements qui se produisent sur plusieurs décennies. Voilà pourquoi nous nous sommes avant tout préoccupés de la pollution des matières persistantes, celles qui restent de nombreuses années dans l'environnement. Nous représentons cette pollution persistante à travers des composés chimiques à vie longue et des métaux produits par l'agriculture et l'industrie pouvant affecter la santé des humains et des cultures. Nous avons tenu compte d'un certain délai avant que la pollution ne parvienne à un endroit où elle peut faire des dégâts mesurables, car nous savons qu'il faut du temps pour qu'un pesticide pénètre dans les nappes souterraines, pour qu'une molécule de chlorofluorocarbone s'élève dans l'air et attaque la couche d'ozone ou pour que le mercure se mêle à l'eau d'un fleuve et s'accumule dans la chair des poissons. Nous avons représenté la possibilité que les processus naturels neutralisent la plupart des polluants au bout d'un certain temps, mais aussi celle que ces processus de nettoyage naturel soient entravés. World3 contient un grand nombre de caractéristiques dynamiques communes à la plupart des polluants persistants, mais il n'entre pas dans le détail des propriétés spécifiques aux PCB, aux CFC, au DDT, aux métaux lourds ni aux déchets radioactifs.

Nous avons utilisé pour World3 les chiffres les plus fiables que nous avons pu trouver, mais nous reconnaissons que nombre de nos estimations présentent une large marge d'incertitude. Lorsqu'ils ont des doutes sur des chiffres importants, les modélisateurs testent tout un éventail de possibilités. Ils regardent si certaines estimations, compte tenu de la marge d'incertitude, donnent des résultats nettement différents. Nous avons ainsi tiré les meilleures conclusions possibles à partir des données des géologues sur la quantité de ressources non renouvelables encore présentes dans le sol. Puis, nous avons divisé et multiplié par deux notre résultat pour voir comment se comporterait notre système si les géologues s'étaient trompés ou si nous avions mal interprété leurs données.

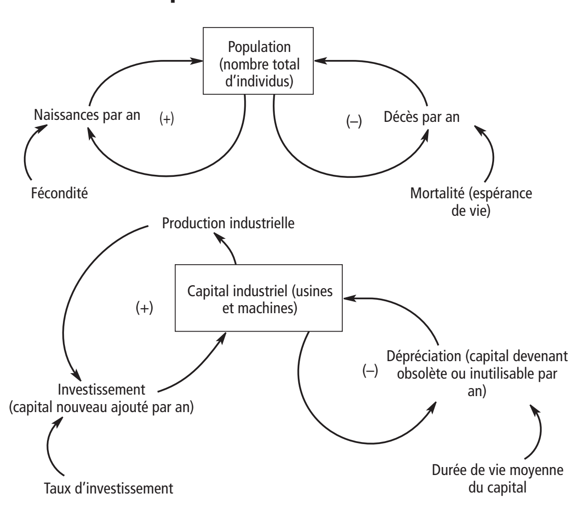
Du fait des incertitudes et des simplifications présentes dans notre modèle et que nous connaissons (sans compter celles dont nous supposons l'existence, même si nous ne les avons pas encore identifiées), nous n'avons pas une entière confiance dans le chemin d'accès numérique précis que le modèle génère en ce qui concerne la population, la pollution, le capital ou la production de nourriture. Nous estimons cependant que les interconnections fondamentales dans World3 sont représentatives des principaux mécanismes causaux de la société humaine. Ce sont ces interconnections, et non les chiffres précis, qui déterminent le comportement général du modèle. En conséquence, nous faisons réellement confiance aux comportements dynamiques générés par World3. Nous présentons 11 scénarios pour l'avenir, jusqu'à l'année 2100, et nous estimons que ces scénarios fournissent des éclairages et des lignes directrices de premier ordre qui nous aident à savoir si et dans quelles conditions la population, l'industrie, la pollution et tous les facteurs liés progresseront, resteront stables, oscilleront ou s'effondreront.

La structure de World3

Quelles sont ces interconnections fondamentales ? Ce sont tout d'abord les boucles de rétroaction impliquant la population et le capital, que nous avons décrites dans le chapitre 2. Elles sont reproduites par la figure 4-4. Elles donnent à la population et au capital le potentiel de croître de façon exponentielle dans le cas où les boucles positives des naissances et de l'investissement l'emportent, le potentiel de baisser si ce sont les boucles négatives des décès et de la dépréciation qui dominent, et le potentiel de rester constants si les boucles s'équilibrent.

Dans tous les schémas représentant des boucles, comme celui de la figure 4-4, les flèches indiquent simplement qu'une variable en influence une autre *via* des flux physiques ou informationnels. Vous pouvez reproduire nos hypothèses en énonçant les étapes de chaque boucle. Ainsi : « À mesure que le capital industriel

FIGURE 4-4 – Boucles de rétroaction de la croissance de la population et du capital



Les principales boucles de rétroaction du modèle World3 déterminent la croissance de la population et celle du capital industriel. Les deux boucles de rétroaction positives concernant les naissances et l'investissement génèrent la croissance exponentielle de la population et du capital. Les deux boucles de rétroaction négatives concernant les décès et la dépréciation ont tendance à réguler cette croissance exponentielle. Les forces relatives des différentes boucles dépendent de nombreux autres facteurs du système.

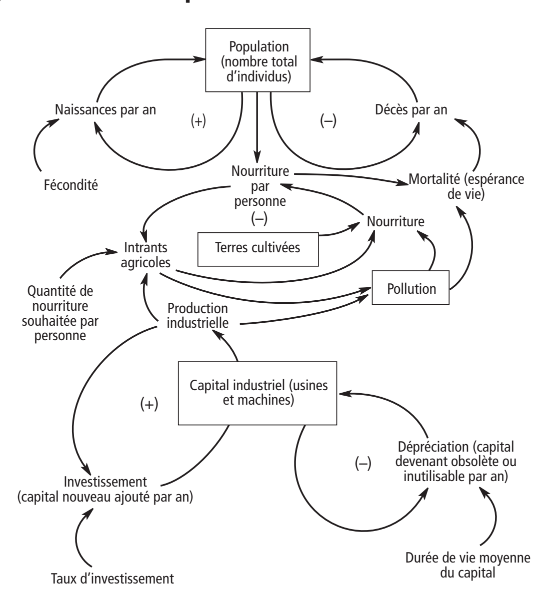
augmente, cela se répercute sur la production industrielle. Les changements affectant celle-ci en entraînent d'autres sur les investissements. Et à mesure que ces derniers évoluent, cela affecte le stock de capital industriel. » Ni la *nature* ni le *degré* des influences exercées ne sont représentés sur le schéma, mais ils sont bien évidemment mentionnés avec précision dans les équations mathématiques qui constituent World3. Le sens dans lequel tournent les diverses influences, sens des aiguilles d'une montre ou l'inverse, ne change rien. Ce qui importe est la composition des boucles.

Les encadrés dans le schéma représentent les *stocks*. Il peut s'agir d'importantes accumulations de quantités physiques telles que des individus, des usines ou de la pollution, mais ces accumulations peuvent aussi être intangibles : connaissances, aspirations, capacité technique. Les stocks d'un système ont tendance à changer lentement, car ils correspondent à des éléments ou des informations qui ont une durée de vie relativement longue. La taille d'un stock représente à l'instant T le résultat net de tous les flux qui ont pénétré dans le stock moins ceux qui en sont sortis. Les usines construites, le nombre d'individus, la quantité de polluants, celle de ressources non renouvelables encore présentes dans le sol et la surface de terres exploitées sont tous, avec d'autres, des stocks importants dans World3. Ils déterminent les limites et les potentialités du système à chaque moment de la simulation.

Les *boucles de rétroaction* sont désignées sur le schéma par un (+) si elles sont positives ; il s'agit alors de boucles qui s'autorenforcent et peuvent entraîner une croissance ou un déclin exponentiels. Elles affichent en revanche un (-) si elles sont négatives ; ce sont alors des boucles téléonomiques, dont le but est d'inverser la direction du changement et d'essayer de rééquilibrer le système.

Certains modes d'influence réciproque de la population et du capital dans World3 sont présentés par la figure 4-5. Le capital industriel génère de la production industrielle qui comprend toutes sortes de produits parmi lesquels les intrants agricoles tels que les engrais, les pesticides et les pompes d'irrigation. On augmente les intrants agricoles lorsque la quantité de nourriture par personne descend en dessous du niveau souhaité. Ce dernier se mesure selon la demande du marché et selon des programmes non marchands d'alimentation de la population, et il varie en fonction du niveau d'industrialisation d'un pays. Les intrants agricoles et la surface de terres cultivées aident à déterminer la production de nourriture. Cette dernière est également touchée par la pollution qui émane des activités industrielles et agricoles.

FIGURE 4-5 – Boucles de rétroaction de la population, du capital, de l'agriculture et de la pollution

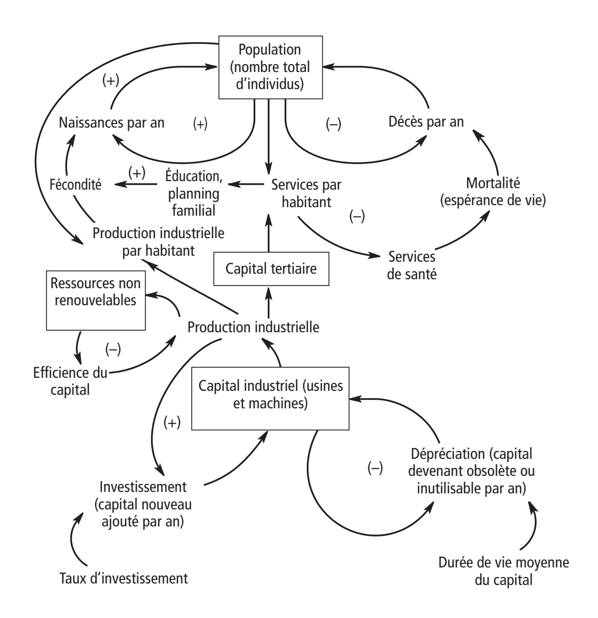


Certaines des interconnexions entre la population et le capital industriel se produisent via le capital agricole, les terres cultivées et la pollution. Chaque flèche indique une relation causale qui peut être immédiate ou différée, importante ou limitée, positive ou négative selon les hypothèses présentes dans chaque modélisation.

La quantité de nourriture par personne et la pollution se répercutent toutes deux sur la mortalité de la population.

La figure 4-6 montre les liens fondamentaux dans World3 entre la population, le capital industriel, le capital tertiaire et les ressources non renouvelables. Une partie de la production industrielle prend la forme de capital tertiaire : maisons, écoles, hôpitaux, banques et tous les équipements qu'ils contiennent. Ce capital est investi dans les services pour augmenter le niveau du capital tertiaire. La production issue du capital tertiaire divisée par la population donne le niveau moyen de services par habitant.

FIGURE 4-6 – Boucles de rétroaction de la population, du capital, des services et des ressources



La population et le capital industriel sont aussi influencés par le niveau de capital tertiaire (santé et éducation, par exemple) et de ressources non renouvelables.

Les services de santé font baisser la mortalité de la population. L'éducation et le planning familial diminuent la fécondité, réduisant ainsi le taux de natalité. L'augmentation de la production industrielle par habitant réduit elle aussi la fécondité, effet qui résulte (moyennant un certain délai) d'un changement dans le secteur de l'emploi. Avec l'industrialisation, le coût lié à l'éducation des enfants augmente et il y a moins d'avantages à avoir une famille nombreuse, si bien que la taille souhaitée de la famille baisse et avec elle, la fécondité.

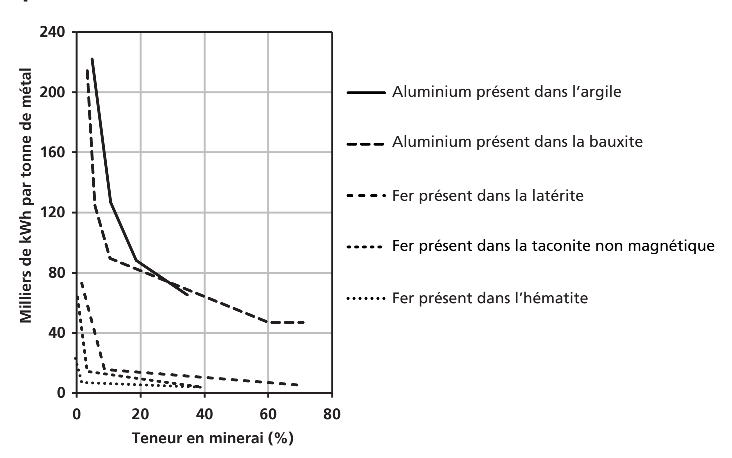
Chaque unité de production industrielle consomme des ressources non renouvelables. Les progrès technologiques intégrés dans le modèle vont progressivement réduire la quantité

de ressources nécessaire par unité de production industrielle, toutes choses égales par ailleurs. Mais ce modèle ne permet en aucun cas à l'industrie de fabriquer des biens matériels à partir de rien, et à mesure que les ressources non renouvelables diminuent, l'efficience du capital de ressources baisse, c'est-à-dire que chaque unité de capital fournit de moins en moins de ressources au secteur industriel. Plus on consomme de ressources, plus la qualité des réserves résiduelles est censée diminuer. Il faut creuser de plus en plus profond pour atteindre des gisements qui sont de plus en plus éloignés du lieu d'exploitation. Cela signifie qu'il faut davantage de capital et d'énergie pour extraire, traiter et transporter une tonne de cuivre ou un baril de pétrole. Sur le court terme, cet état de fait peut être compensé par le progrès technologique, mais à long terme, c'est bel et bien la capacité de croissance physique qui diminue.

La relation entre les ressources restantes et la quantité de capital nécessaire pour les obtenir est tout sauf linéaire. On peut voir la forme générale de la courbe grâce à la figure 4-7 qui montre l'énergie requise pour extraire et traiter du fer et de l'aluminium selon différentes teneurs en minerai. L'énergie est différente du capital (il est difficile de mesurer la véritable quantité de capital utilisée dans l'exploitation d'un minerai), mais la quantité d'énergie nécessaire pour accomplir chaque tâche en dit long sur le capital requis. Plus la teneur en minerai diminue, plus il faut soulever de roche par tonne de ressource finale, plus son broyage doit donner de fines particules, plus les différents minéraux qui la composent doivent être triés avec soin et plus les résidus miniers à traiter sont volumineux. Tout ce processus nécessite des machines. Or s'il faut consacrer davantage d'énergie et de capital à la production des ressources, cela signifie qu'on peut moins investir dans d'autres secteurs de l'économie, toutes choses égales par ailleurs.

Un schéma représentant toutes les interconnexions intégrées dans World3 et illustrant toutes les hypothèses que contient le modèle est reproduit sur le CD-ROM de World3 où l'on trouvera bien plus de détails sur chacun des 11 scénarios.

FIGURE 4-7 – Énergie nécessaire pour produire du métal pur à partir d'un minerai



À mesure que leur teneur en métal baisse, il faut de plus en plus d'énergie pour purifier les minerais. **(Sources : N. J. Page et S. C. Creasey)**

Mais il n'est nul besoin de comprendre tous ces liens pour saisir la manière dont le modèle fonctionne et pour apprécier ses scénarios. Il convient simplement de bien appréhender les paramètres les plus importants :

- Les processus de croissance
- Les limites
- Les retards
- Les processus d'érosion

Nous avons déjà décrit les processus de croissance de la population et du capital dans le chapitre 2. Dans le chapitre 3, nous avons donné de nombreuses informations sur les limites environnementales dans le « monde réel ». Nous allons à présent décrire les limites telles qu'elles sont représentées par World3, puis nous nous pencherons sur les retards et les processus d'érosion que nous avons intégrés à notre modèle informatique.

La question qu'il faut garder à l'esprit en lisant les pages suivantes est de savoir si et dans quelles circonstances il existe des similitudes ou au contraire des divergences entre le modèle informatique dont nous parlons et la population et l'économie réelles telles qu'elles figurent dans votre représentation mentale. Lorsqu'il y aura des divergences, vous serez confrontés aux mêmes questionnements que ceux que les modélisateurs rencontrent sans cesse : lequel des deux modèles, le vôtre ou celui de World3, semble le plus adapté à une réflexion sur l'avenir ? Existe-t-il un test qui permettrait de répondre à cette question ? Si c'est le modèle informatique qui est le plus adapté, lesquels de ses paramètres devez-vous intégrer à votre représentation mentale pour que vos interprétations des problèmes qui touchent la planète soient pertinentes et vos actions, efficaces ?

Les limites et l'absence de limites

Une économie qui croît de façon exponentielle épuise les ressources, rejette des déchets et détourne les terres de la production de ressources renouvelables. Étant donné que cette économie opère au sein d'un environnement fini, elle va exercer certaines pressions sur ce dernier. Celles-ci commencent à prendre de l'ampleur bien avant que la société n'arrive au stade où toute croissance supplémentaire devient totalement impossible. Réagissant à ces pressions, l'environnement envoie à l'économie des signaux, qui prennent différentes formes. Il faut par exemple davantage d'énergie pour pomper les aquifères qui contiennent moins d'eau, l'investissement nécessaire pour exploiter un hectare de nouvelles terres agricoles s'élève, les dégâts causés par certaines émissions que l'on croyait inoffensives deviennent soudainement visibles et les systèmes naturels de la planète mettent plus de temps à guérir des attaques de la pollution. Cette augmentation des coûts réels ne se traduit pas obligatoirement par une hausse immédiate des prix, car les marchés peuvent faire baisser ces derniers par des décrets ou des subventions, ou influer sur eux d'une autre manière.

Mais renforcés ou non par l'augmentation des prix du marché, les signaux et les pressions sont des parties constitutives importantes des boucles de rétroaction négatives. Ils cherchent à aligner l'économie sur les contraintes du système environnant. En d'autres termes, ils cherchent à stopper l'augmentation de l'empreinte écologique qui fait pression sur les sources et les exutoires de la planète.

World3 ne contient que quelques limites liées aux sources et aux exutoires de la Terre. (Le « monde réel » en contient bien plus.) Toutes peuvent être repoussées ou abaissées par la technologie, l'action, le changement d'objectifs et les choix faits à l'intérieur du modèle informatique. Voici quelles sont ces limites dans la version standard ou par défaut de World3 :

- *La terre cultivée* est la terre utilisée pour toutes les formes d'agriculture. Nous partons du principe que la surface maximale possible est 3,2 milliards d'hectares. Plus on investit dans le développement du territoire, plus les terres cultivées s'étendent. Comme l'a montré la figure 4-2, le coût du développement de nouvelles terres est censé augmenter puisque les terres les plus accessibles et les plus fertiles sont exploitées en premier. La terre ne peut plus être cultivée quand elle s'érode et quand elle est utilisée à des fins d'urbanisation et d'industrialisation. Des investissements dans l'entretien des terres peuvent aider à pallier l'érosion.
- *La fertilité de la terre* est la faculté qu'a le sol d'entretenir la croissance des végétaux, faculté qui dépend tout à la fois des éléments nutritifs, de l'épaisseur du sol, de sa capacité à retenir l'eau, de sa structure et du climat. Nous faisons l'hypothèse que la fertilité du sol en 1900 était suffisante pour permettre la production annuelle de 600 kg par hectare d'équivalent céréales sans apport d'engrais. La fertilité du sol est réduite par la pollution qui vient en partie des intrants utilisés dans l'agriculture industrielle. Une terre dégradée mise en jachère est censée recouvrer la moitié de sa fertilité en 20 ans, mais

cela peut être infiniment plus rapide si des investissements sont consentis à cet effet (apport de fumier, plantation de légumineuses ou compostage).

- *Le rendement réalisable par unité de terre* dépend de la fertilité du sol, de la pollution de l'air, de l'intensité des intrants industriels comme les engrais et de l'avancée de la technologie. Les intrants industriels augmentent le rendement, mais leur apport va en diminuant : chaque kilogramme d'engrais supplémentaire donne un rendement moindre que le kilogramme précédent. Nous partons de l'hypothèse que l'utilisation d'intrants industriels peut multiplier la fertilité naturelle de la terre par 7,4 tout au plus (ce qui fait tout de même 740 %, et c'est valable pour toutes les terres et non simplement les plus productives !).
- *Les ressources non renouvelables* sont les minéraux, les métaux et les combustibles fossiles. Nous démarrons le modèle avec une simulation de l'année 1900 où les stocks de ces ressources sont 7 000 fois plus importants que le taux d'extraction de cette année-là[7]. L'investissement nécessaire pour trouver et extraire les ressources non renouvelables augmente puisque les gisements les plus riches et les plus accessibles sont exploités en premier.
- *La faculté de la Terre à absorber la pollution* est une autre limite figurant dans World3. Elle représente l'effet net de toutes sortes de processus différents qui séquestrent ou convertissent les matières toxiques à vie longue de telle sorte qu'elles ne soient plus nuisibles. Il s'agit ici de matières telles que les organochlorés, les gaz à effet de serre et les déchets radioactifs. Nous exprimons cette limite à travers « la demi-vie » d'assimilation de l'environnement, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que les processus naturels rendent inoffensive la moitié de la

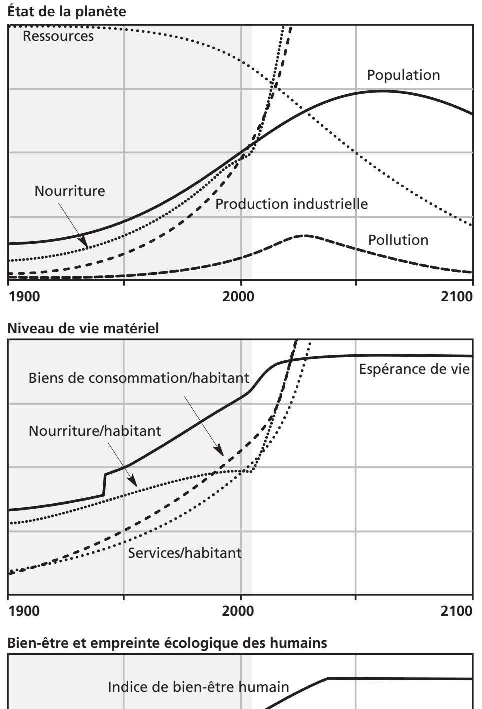
7. Il n'y a que pour les scénarios 0 et 1 que nous partons de l'hypothèse que la quantité initiale de ressources non renouvelables est inférieure de moitié à celle mentionnée ci-dessus.

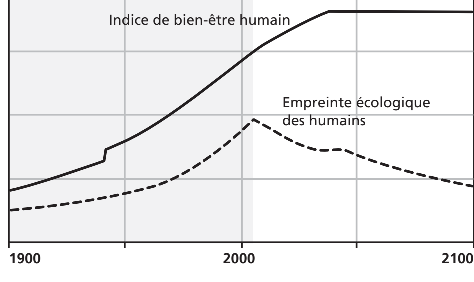
pollution existante. Bien sûr, certaines matières, comme les isotopes du plutonium, ont une demi-vie quasi infinie. Mais nous avons pris des valeurs très optimistes. Nous sommes partis du principe qu'en 1970, la demi-vie d'assimilation était d'un an. Si la pollution persistante augmentait jusqu'à atteindre 250 fois le niveau de 1970, sa demi-vie passerait à 10 ans. Sur le plan quantitatif, c'est la limite que l'on maîtrise le moins, même pour chaque polluant pris séparément. Il y a donc une incertitude considérable quant au niveau de cette limite lorsqu'il y a plusieurs polluants persistants à la fois.

Heureusement, les hypothèses concernant la disparition des polluants persistants n'ont pas beaucoup d'importance dans le modèle, car ces matières affectent peu les autres paramètres de World3. Nous avons formulé l'hypothèse que si la pollution accumulée devenait cinq fois plus importante qu'elle ne l'était en 2000, cela réduirait l'espérance de vie des humains de moins de 2 %. Mais dans chacun de nos 11 scénarios, la pollution persistante équivaut rarement à cinq fois son niveau de 2000. Lorsque c'est le cas, c'est-à-dire dans les scénarios extrêmes, cela réduit chaque année la fertilité de la terre de 10 % et plus, mais ces 10 % peuvent être contrebalancés par des investissements dans l'entretien des terres. Dans ce modèle, nous testons également d'autres estimations pour observer leurs effets.

Il existe dans le « monde réel » beaucoup d'autres limites, parmi lesquelles des limites managériales et sociales. Certaines d'entre elles sont implicites dans les chiffres de World3 puisque les coefficients de notre modèle viennent de la « vraie » histoire de la planète sur ces 100 dernières années. Mais il n'y a ni guerre, ni grève, ni corruption, ni toxicomanie, ni crime, ni terrorisme dans World3, sa population fait de son mieux pour résoudre les problèmes qu'elle perçoit, mais n'est perturbée par aucune lutte pour le pouvoir, aucune intolérance ethnique, aucune corruption. Intégrant très peu de limites sociales, World3 offre donc un tableau trop optimiste des scénarios futurs.

FIGURE 4-8 – Scénario 0 : Infinité en entrée, infinité en sortie





Lorsque toutes les limites physiques du système World3 sont supprimées, la population connaît un pic aux alentours de 9 milliards d'individus, puis amorce une lente baisse provoquée par la transition démographique. L'économie se développe jusqu'à atteindre en 2080 une production 30 fois plus importante que celle de l'année 2000, tout en utilisant la même quantité de ressources non renouvelables par an et en engendrant chaque année 8 fois moins de pollution.

Et si nous nous trompions, par exemple, sur la quantité de ressources non renouvelables qu'il reste à découvrir dans le sol ? S'il n'y en avait en fait que la moitié, ou le double, ou 10 fois plus que ce que nous avons supposé ? Et si la « vraie » capacité de la Terre à absorber la pollution pour qu'elle ne nuise pas aux humains ne correspondait pas à 10 fois le taux d'émissions de 1990, mais à 50 ou 500 fois ? (Ou, au contraire, à 0,5 fois ?) Et si l'humain inventait des technologies qui réduisaient (ou augmentaient) les émissions de pollution par unité de production industrielle ?

C'est à cela que sert un modèle informatique : à répondre à ces questions. Il permet de faire des tests rapidement et à peu de frais. Car il est possible de tester tous ces « Et si… ». On peut, par exemple, régler les données correspondant aux limites de World3 de façon à ce que celles-ci soient exagérément élevées ou encore de les programmer pour qu'elles croissent de façon exponentielle. Nous l'avons fait. Lorsqu'on supprime toutes les limites physiques du système en supposant que la technologie a un potentiel illimité, un impact instantané, ne coûte rien et ne commet pas d'erreur, l'économie humaine simulée croît de façon considérable. La figure 4-8, qui présente le Scénario 0, montre ce qu'il advient alors.

Comment lire les scénarios de World3

Dans les chapitres 4, 6 et 7 de cet ouvrage, nous présentons 11 « simulations numériques » ou scénarios différents générés par World3. Chaque simulation est réalisé à partir de la même structure informatique, mais à chaque scénario, nous modifions certains chiffres pour tester différentes estimations des paramètres du « monde réel » ou pour intégrer des prévisions plus optimistes concernant l'évolution des technologies, ou encore pour voir ce qui se produit selon les politiques, éthiques ou objectifs que le monde fait siens.

Une fois que nous avons apporté les modifications que nous voulons tester lors de la nouvelle simulation, nous demandons à

World3 de recalculer les interactions entre les 200 équations et plus qu'il contient puisqu'elles exercent en permanence une influence les unes sur les autres. L'ordinateur calcule alors une valeur nouvelle pour chaque variable tous les six mois entre 1900 et 2100. Il produit plus de 80 000 chiffres par scénario. Mais il n'est pas utile de reproduire ici toutes ces informations, car seul un petit nombre de ces chiffres ont une signification lorsqu'on les prend isolément. Nous procédons donc à une importante simplification dans le double but de comprendre nous-mêmes les résultats fournis par World3 et de pouvoir vous les communiquer.

Nous simplifions en reportant sur des graphiques temporels les valeurs de certaines variables clés comme la population, la pollution et les ressources naturelles. Nous allons faire apparaître dans ce livre trois de ces graphiques par scénario et leur structure sera toujours la même : le graphique du haut, intitulé « État de la planète », comportera des données mondiales concernant :

1. **La population**
2. **La production de nourriture**
3. **La production industrielle**
4. **Le niveau relatif de pollution**
5. **Les ressources non renouvelables résiduelles**

Le graphique du milieu, intitulé « Niveau de vie matériel », donnera des valeurs mondiales moyennes au sujet de :

6. **La production de nourriture par habitant**
7. **Les services par habitant**
8. **L'espérance de vie moyenne**
9. **Les biens de consommation par habitant**

Quant au graphique du bas, intitulé « Bien-être et empreinte écologique des humains », il indiquera les valeurs de deux indicateurs mondiaux :

10. **L'empreinte écologique des humains**
11. **L'indice de bien-être humain**

Toutes les échelles verticales démarrent à zéro et pour faciliter la comparaison, nous avons conservé l'échelle verticale de chaque variable à chacune des simulations. Nous n'avons en revanche mentionné aucun chiffre sur cette échelle, car les valeurs précises de chaque point de temps simulé ne sont pas significatives. Il faut noter en outre que les variables d'un même graphique renvoient toutes à des échelles et des unités différentes. Ainsi, l'échelle de la nourriture par habitant s'étend de 0 à 1 000 kg d'équivalent céréales par personne et par an, tandis que l'échelle de l'espérance de vie va de 0 à 90 ans.

Étant donné que les chiffres ne sont pas significatifs, il faut prêter attention au changement de formes des courbes selon les scénarios. Pour les scénarios représentant un effondrement, nous n'avons cependant pas attribué de signification particulière au comportement des courbes au-delà du point où elles atteignent un pic, puis commencent à baisser. Si chaque scénario est entièrement représenté jusqu'à l'année 2100, nous ne décrivons le comportement d'aucun élément une fois qu'un facteur important a commencé à s'effondrer. Il est clair qu'un effondrement de la population ou de l'industrie dans le « monde réel » aurait des répercussions sur un grand nombre de relations de première importance, invalidant en cela bien des hypothèses que nous avons intégrées dans le modèle.

Chaque fois que nous générons un scénario, l'ordinateur crée une table détaillée de données comprenant les chiffres de chaque variable du modèle tous les six mois entre 1900 et 2100. Il s'agit donc de tables regroupant des quantités astronomiques de données détaillées. On voit ainsi sur la table du Scénario 0 que la population mondiale atteint un pic avec 8 876 186 000 individus lors de l'année de modélisation 2065,0. L'indice de pollution persistante dans ce scénario passe de 3,150530 en 2000 à 6,830552, soit son maximum, l'année de modélisation 2026,5 ; il a donc été multiplié par 2,1680 sur cette période. Mais la plupart de ces chiffres ne nous livrent pas d'information utile. Aucune date ni aucun chiffre produit par World3 au sujet de l'avenir ne nécessite

une précision à cinq chiffres. Ne perdons pas de vue que nous nous intéressons aux grandes lignes. Nous ne nous préoccupons que de quelques variables clés et ne posons que quelques questions également clés. Quelles sont les variables qui cessent de croître entre 2000 et 2100 ? À quelle vitesse augmentent-elles ou baissent-elles ? Quels sont les principaux facteurs responsables de ce comportement ? Les hypothèses intégrées dans un scénario ont-elles pour effet d'accélérer ou de ralentir la croissance d'une variable ? De lui faire atteindre un pic plus élevé ou moins élevé ? Quels changements de politique pourraient donner un résultat plus positif ?

Chaque fois que nous vous communiquerons les réponses à ces questions, scénario par scénario, nous simplifierons considérablement les résultats de l'ordinateur en nous cantonnant à deux règles : la date d'avènement d'un maximum ou d'un minimum sera arrondie à la décennie la plus proche (et à 5, nous arrondirons à la décennie suivante). Ainsi, ce ne sera pas 2016, 2032,5 ni 2035, mais 2020, 2030 et 2040. Chaque valeur d'un paramètre en particulier et chaque ratio entre deux chiffres seront arrondis au chiffre significatif le plus proche. Voilà pourquoi nous exprimerons les informations ci-dessus concernant le Scénario 0 en disant : « La population mondiale atteint une valeur maximale avec 9 milliards d'individus lors de l'année de modélisation 2070. L'indice de pollution persistante dans ce scénario passe de 3 en 2000 à une valeur maximale de 7 lors de l'année de modélisation 2030, ce qui signifie qu'il double durant cette période. » Ces deux règles produiront parfois de légères incohérences. Il ne faut pas y prêter attention, elles sont dues au fait que nous arrondissons les valeurs. Mais elles ne modifient en aucun cas les enseignements fondamentaux que nous pouvons tirer de World3.

La simulation représentée par la figure 4-8, le Scénario 0, a été produit par World3 après que nous avons modifié ses paramètres pour faire les hypothèses suivantes :

- La quantité de ressources non renouvelables requises pour obtenir une unité de production industrielle chute de façon exponentielle et sans limite au rythme de 5 % par an, diminuant de 50 % tous les 15 ans tant que la société s'efforce d'améliorer son efficience en matière de ressources.
- La quantité de pollution générée par unité de production industrielle chute de façon exponentielle et sans limite au rythme de 5 % par an à chaque fois qu'on le souhaite.
- Le rendement agricole par unité de production industrielle augmente de façon exponentielle et sans limite au rythme de 5 % par an, doublant tous les 15 ans tant que la société s'efforce d'accroître sa production de nourriture.
- Ces prouesses techniques produisent leur effet à travers l'économie de la planète tout entière sans dépense de capital supplémentaire au bout de 2 ans seulement (contre 20 dans le modèle de départ) à partir du moment où la société a décidé qu'une telle technologie était souhaitable.
- Les peuplements humains empiètent sur les terres agricoles quatre fois moins vite que ce qui est normalement calculé par World3 et les humains ne constatent aucun effet négatif du surpeuplement sur leur espérance de vie.
- La production agricole n'est plus réduite de manière significative par la pollution.

Dans cette simulation, la population connaît un ralentissement de sa croissance, se stabilise à presque 9 milliards d'individus, puis diminue progressivement, car tous les habitants de la planète jouissent d'un niveau de vie suffisant pour que la transition démographique ait lieu. L'espérance de vie moyenne se stabilise autour de 80 ans dans le monde entier. Le rendement agricole moyen atteint en 2080 six fois ou presque celui de 2000. La production industrielle explose jusqu'à atteindre les limites du graphique, mais elle est finalement stoppée à un niveau très élevé par une forte pénurie de main-d'œuvre, car il y a 40 fois plus de capital industriel à gérer qu'en 2000, mais seulement 1,5 fois plus

d'individus. (Nous pourrions même supprimer cette limite en supposant une augmentation exponentielle suffisamment rapide de la capacité de travail pour que tout le capital soit exploité.)

Lors de l'année de simulation 2080, l'économie mondiale atteint une production industrielle 30 fois supérieure et une production alimentaire 6 fois supérieure à celles de 2000. Pour y parvenir, elle a accumulé durant les 8 premières décennies du XXIe siècle presque 40 fois plus de capital industriel qu'elle ne l'avait fait pendant tout le siècle précédent. Tout en connaissant pareille expansion du capital, le monde décrit par la figure 4-8 réduit légèrement son utilisation de ressources non renouvelables et émet 8 fois moins de pollution qu'en 2000. Le bien-être des humains augmente de 25 % entre 2000 et 2080 et leur empreinte écologique baisse de 40 %. Au terme du scénario, c'est-à-dire en 2100, cette empreinte écologique est largement redescendue en dessous du niveau soutenable.

Certains croient en ce genre de scénario, s'y attendent et s'en délectent. Nous avons d'ailleurs des exemples d'augmentation spectaculaire de l'efficience dans certains pays, certains secteurs de l'économie ou certains processus industriels. Nous en avons évoqué beaucoup dans le chapitre 3. Nous espérons et nous pensons assister à de nouvelles améliorations de l'efficience, peut-être même des améliorations qui atteindront les 100 %. Mais les données exposées dans le chapitre 3 n'annoncent pas d'amélioration aussi rapide de l'*économie mondiale*. Si rien d'autre ne venait entraver pareille progression, la simple durée de vie des installations, c'est-à-dire le temps qu'il faut pour remplacer ou moderniser le parc de véhicules, le parc immobilier et l'ensemble des machines de l'économie mondiale, et la faculté du capital existant à produire aussi rapidement une telle quantité de capital nouveau rendent ce scénario de la « dématérialisation » improbable à nos yeux. Enfin ces difficultés seraient amplifiées dans la « vraie vie » par les nombreux freins politiques et bureaucratiques qui empêcheraient le système monétaire de signaler que les technologies dont nous avons besoin peuvent être rentables.

Nous incluons cette simulation dans cet ouvrage non parce que nous pensons qu'il présente un avenir plausible du « monde réel », mais parce que nous estimons qu'il montre comment fonctionne World3.

Il montre en effet que World3 a intégré à sa structure une contrainte autolimitante pour la population mais pas pour le capital. Il est structuré de telle façon que la population mondiale va finir par se stabiliser et baisser si la production industrielle par habitant augmente suffisamment. Mais, dans le « monde réel », on voit rarement les individus ou les pays les plus riches cesser à un moment de vouloir s'enrichir davantage. C'est pourquoi les politiques intégrées à World3 traduisent l'hypothèse que les détenteurs du capital vont continuer indéfiniment à chercher à s'enrichir et que les consommateurs vont toujours chercher à consommer davantage. Des hypothèses qui peuvent être modifiées et qui le seront dans les scénarios présentés dans le chapitre 7.

La figure 4-8 illustre également l'un des principes les plus connus en modélisation : la qualité des résultats est fonction de la qualité des données. Si vous rentrez des hypothèses non réalistes dans votre modèle, vous obtiendrez des résultats non réalistes. L'ordinateur vous présente les conséquences logiques de vos hypothèses, mais il ne vous dit pas si ces dernières sont bonnes. Si vous partez du principe que l'activité économique peut multiplier par 40 l'accumulation de capital industriel, qu'il n'y a plus de limites physiques, que les évolutions techniques peuvent être intégrées dans les installations du monde entier en seulement deux ans et pour un coût nul, World3 vous sortira une croissance économique quasi illimitée s'accompagnant d'une empreinte écologique en baisse. La question fondamentale à cet égard et concernant toutes les simulations informatiques est de savoir si vous croyez aux hypothèses de départ.

Nous ne croyons pas aux hypothèses qui sont derrière la figure 4-8. Nous estimons qu'il s'agit d'un scénario qui décrit une utopie technologique. C'est la raison pour laquelle nous avons intitulé cette simulation « Infinité en entrée, infinité en sortie ».

Mais lorsqu'on intègre ce que nous considérons comme des hypothèses plus « réalistes », le modèle montre le comportement d'un système en expansion qui se heurte à la résistance des limites physiques.

Avec limites et avec retard

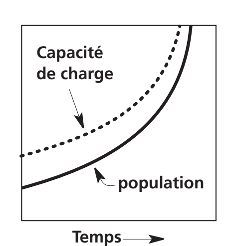
Une entité physique en expansion ralentit puis s'arrête en douceur pour se conformer à ses limites (croissance en forme de S) uniquement si elle reçoit rapidement des signaux précis lui indiquant où elle se situe par rapport à ses limites et si elle y répond rapidement et avec précision (figure 4-9b).

Imaginez que vous êtes au volant d'une voiture et que vous voyez devant vous un feu qui passe au rouge. Normalement, vous pouvez freiner en douceur et vous arrêter à temps parce qu'un signal visuel rapide et précis vous indique où se situe le feu, que votre cerveau réagit rapidement à ce signal, que votre pied fait un rapide mouvement vers la pédale lorsque vous décidez de freiner et que votre voiture réagit immédiatement au freinage d'une façon que vous connaissez bien puisque vous utilisez souvent les freins.

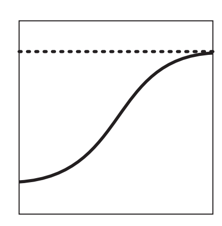
Si le pare-brise de la voiture était embué de votre côté et que vous dépendiez du passager pour vous dire où se situe le feu, le léger retard dû à la communication ferait que vous ne vous arrêteriez pas à temps (à moins que vous n'ayez ralenti pour compenser ce retard). Si le passager vous avait menti, si vous ne l'aviez pas cru, si les freins avaient mis du temps à réagir ou encore si la route avait été verglacée si bien qu'il aurait fallu plusieurs centaines de mètres à votre voiture pour s'arrêter, vous auriez dépassé le feu.

Un système ne peut pas parvenir en douceur à un état d'équilibre précis vis-à-vis de ses limites si le signal de réaction arrive trop tard ou est déformé, si le système n'en tient pas compte ou s'il n'y croit pas, s'il y a une erreur d'adaptation ou si le système ne peut réagir qu'au bout d'un certain moment. Si l'une de ces conditions s'applique, l'entité en expansion va s'autocorriger trop tard et dépasser la limite (figures 4-9c et d).

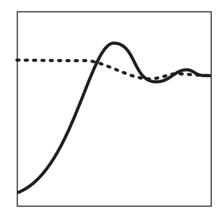
FIGURE 4-9 – Causes structurelles des quatre modes de comportement possibles du modèle World3



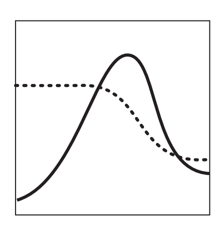
a – Il y a croissance continue lorsque
Les limites physiques sont très éloignées, ou les limites physiques croissent elles-mêmes de façon exponentielle.



b – Il y a croissance sigmoïde lorsque
Les signaux émis par les limites physiques envers l'économie sont instantanés, précis et provoquent une réaction immédiate, ou la population ou l'économie se limitent d'elles-mêmes sans avoir besoin des signaux des limites extérieures.



c – Il y a dépassement et oscillation lorsque
Les signaux ou les réactions arrivent avec un temps de retard, et les limites ne peuvent s'éroder ou peuvent se permettre rapidement de l'érosion.



d – Il y a dépassement et effondrement lorsque
Les signaux ou les réponses arrivent avec un temps de retard, et les limites peuvent s'éroder (et sont irréversiblement dégradées lorsqu'elles sont dépassées).

Nous avons déjà décrit certains retards d'information et de réaction dans World3. L'un d'eux est dû au temps qui s'écoule entre le moment où une substance polluante est rejetée dans la biosphère et celui où elle provoque des dégâts observables sur la santé humaine ou sur les aliments consommés par l'homme. Il

faut ainsi entre 10 et 15 ans pour qu'une molécule de chlorofluorocarbones relâchée à la surface de la Terre s'attaque à la couche d'ozone stratosphérique. Les retards dans la mise en place des politiques sont également importants. Il faut souvent attendre de nombreuses années entre la date à laquelle un problème est observé pour la première fois et celle où tous les acteurs importants admettent l'existence de ce problème et tombent d'accord sur un plan d'action commun. Ces temps de réaction sont décrits dans le chapitre suivant.

La percolation des PCB à travers l'environnement est une illustration de ces temps de réaction. L'industrie a fabriqué depuis 1929 quelque deux millions de tonnes de ces produits chimiques stables, huileux et ininflammables que l'on appelle les polychlorobiphényles ou PCB[8]. Ils ont surtout été utilisés comme caloporteurs dans les condensateurs et les transformateurs électriques, mais aussi comme fluides hydrauliques, lubrifiants, produits ignifugeants et constituants de peintures, vernis, encres, papiers autocopiants et pesticides. Pendant 40 ans, les utilisateurs de ces produits chimiques les ont jetés dans des décharges, le long des routes, dans des égouts ou des cours d'eau sans se préoccuper des conséquences sur l'environnement. Puis, en 1966, dans une étude qui a fait date, destinée à l'origine à détecter le DDT dans l'environnement, le chercheur danois Sören Jensen révélait qu'en plus du DDT, il s'était aperçu que les PCB étaient eux aussi très répandus[9]. Depuis, d'autres chercheurs ont trouvé des PCB dans tous les écosystèmes planétaires ou presque.

> *Les PCB sont présents dans chaque composant ou presque de l'écosystème mondial. L'hydrosphère représente une importante source de PCB atmosphériques… On a également détecté des résidus de*

---

8. On dénombre 209 de ces substances chimiques, toutes créées en ajoutant des atomes de chlore à différents endroits des deux anneaux de benzène liés qui constituent la molécule de biphényle. Elles sont synthétisées par l'humain et n'existent pas à l'état naturel.

9. Sören Jensen, « Report of a New Chemical Hazard », *New Scientist*, vol. 32, 1966.

PCB dans les sédiments des fleuves, des lacs et des océans… Une étude de l'ensemble de l'écosystème des Grands Lacs indique clairement une bioconcentration particulièrement élevée des PCB dans la chaîne alimentaire.

– Environnement Canada, 1991

Le DDT et les PCB sont les seuls organochlorés dont un suivi systématique a été assuré chez les mammifères marins arctiques… Les taux de PCB relevés dans le lait des femmes inuits sont parmi les plus élevés qu'on ait jamais vus… L'importante consommation de poisson et de mammifères marins est sans doute la principale voie d'ingestion des PCB… Les résultats indiquent que des composés toxiques comme les PCB pourraient jouer un rôle dans la baisse de l'immunité et la fréquence des infections chez les enfants inuits.

– E. Dewailly, 1989

[Dans la mer des Wadden, au nord des Pays-Bas], *le taux de reproduction des phoques ayant reçu l'alimentation qui contenait le plus de* [PCB] *a fortement diminué…* [ce qui signifie que] *les difficultés de reproduction chez les phoques communs sont liées au fait qu'ils se nourrissent de poisson issu de cette zone polluée… Ces résultats corroborent ceux d'expériences menées auprès de visons dont la reproduction était affaiblie par les PCB.*

– P.J.H. Reijnders, 1986

La plupart des PCB sont relativement insolubles dans l'eau, mais solubles dans les graisses et leur durée de vie dans l'environnement est très longue. Ils se déplacent vite dans l'atmosphère, mais lentement dans les sols et les sédiments des cours d'eau et des lacs et finissent par être absorbés par une forme de vie quelconque ; ils s'accumulent alors dans les tissus graisseux et leur concentration augmente à mesure qu'ils s'élèvent dans la chaîne alimentaire. C'est dans les poissons carnivores, les oiseaux marins et les mammifères, la graisse humaine et le lait maternel qu'on les trouve sous leur forme la plus concentrée.

On découvre à un rythme très lent l'impact des PCB sur la santé des humains et d'autres animaux. Cet impact est particulièrement

difficile à déceler, car il existe 209 composés similaires, chacun pouvant produire des effets différents. Il semble néanmoins évident que certains PCB agissent comme perturbateurs endocriniens. Ils imitent l'action de certaines hormones comme l'estrogène et bloquent l'action de certaines autres comme les hormones thyroïdiennes. Conséquence : chez les oiseaux, les baleines, les ours polaires, les humains et tout autre animal doté d'un système endocrinien, les PCB brouillent certains signaux faibles qui gouvernent le métabolisme et le comportement. Chez les embryons notamment, ils peuvent, même en quantités infimes, avoir un effet dévastateur. Ils peuvent tout simplement tuer l'organisme qui se développe, ou bien toucher le système nerveux, le cerveau ou les fonctions sexuelles[10].

Étant donné leur lente migration, leur durée de vie très longue et le fait qu'ils s'accumulent au sommet de la chaîne alimentaire, les PCB ont été qualifiés de « bombes à retardement ». Leur fabrication et leur utilisation sont interdites dans de nombreux pays depuis les années 1970[11], mais il en existe toujours un stock considérable. Sur la quantité totale de PCB qui ont été fabriqués, une grande partie est toujours utilisée ou se trouve dans des équipements électriques abandonnés. Dans les pays qui ont voté des lois sur les déchets dangereux, une partie de ces vieux PCB est enfouie ou jetée après une incinération contrôlée qui casse leur structure moléculaire et stoppe donc leur bioactivité. On a estimé en 1989 que 30 % de tous les PCB jamais fabriqués avaient déjà été rejetés dans l'environnement. Seulement 1 % d'entre eux a atteint les océans et les 29 autres pourcents ont été dispersés dans les sols,

---

10. Pour un exposé facile d'accès et exhaustif sur les perturbateurs endocriniens, voir Theo Colborn, Dianne Dumanoski et John P. Myers, *L'homme en voie de disparition ?*, Mens, Terre Vivante, 1998, qui contient plusieurs centaines de références sur la littérature scientifique en plein essor traitant de ce thème.

11. L'Union soviétique n'a arrêté d'en fabriquer qu'en 1990.

les fleuves et les lacs où ils évolueront au sein d'êtres vivants pendant encore des dizaines d'années[12].

La figure 4-10 montre un autre exemple de temps de réaction en matière de pollution : la lente progression de certains produits chimiques dans le sol jusqu'aux eaux souterraines. Depuis les années 1960 et jusqu'en 1990, où il a fini par être interdit, le désinfectant du sol 1,2-dichloropropène (DCPe) a été énormément utilisé aux Pays-Bas pour la culture des pommes de terre et des bulbes à fleur. Il contient un contaminant, le 1,2-dichloropropane (DCPa), qui, dans l'état actuel des connaissances des scientifiques, a une durée de vie infinie dans les eaux souterraines. Selon des calculs effectués sur un bassin versant, le dichloropropane déjà présent dans le sol va évoluer en profondeur jusqu'aux eaux souterraines où il ne sera présent en quantité significative qu'après 2010. Il contaminera ensuite ces eaux pendant au moins un siècle avec des concentrations allant jusqu'à 50 fois la norme de l'Union européenne en matière d'eau potable.

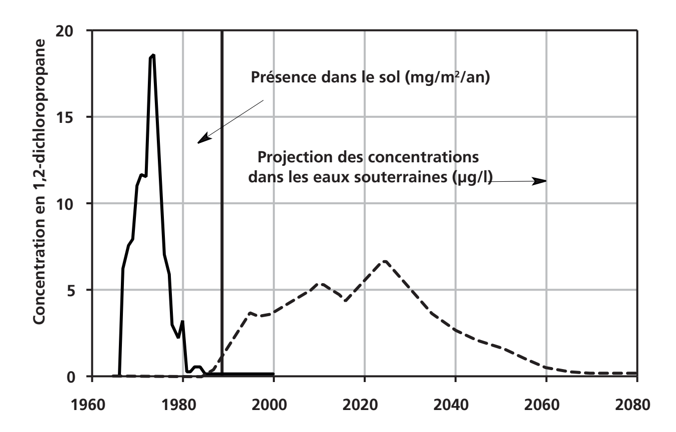
Les Pays-Bas n'ont pas l'exclusivité de ce problème. Aux États-Unis, l'utilisation du DCP à des fins agricoles a été arrêtée en 1977. Cela n'a pourtant pas empêché le Washington State Pesticide Monitoring Program de trouver le produit chimique à des concentrations censées être dangereuses pour la santé humaine lorsqu'il a surveillé les eaux souterraines sur 243 sites répartis en 11 zones d'étude entre 1988 et 1995[13].

Le temps de réaction dans un autre secteur de World3 est dû à la structure par âges de la population. En effet, une population qui, récemment encore, enregistrait un taux de natalité élevé, compte bien plus de jeunes que de vieux. C'est pourquoi, même

12. J. M. Marquenie et P. J. H. Reijnders, « Global Impact of PCBs with Special Reference to the Arctic », compte rendu du 8e congrès international du Comité arctique international, Oslo, 18-22 septembre 1989, Lillestrom, Norvège, NILU.

13. A. Larson, « Pesticides in Washington State's Ground Water, A Summary Report, 1988-1995 », Report 96-303, Washington State Pesticide Monitoring Program, janvier 1996.

FIGURE 4-10 – La lente percolation du 1,2-dichloropropane dans les eaux souterraines



Ce désinfectant du sol a été utilisé en grande quantité aux Pays-Bas dans les années 1970, puis son utilisation a été limitée, pour finalement être interdite en 1990. Résultat : sa concentration dans les couches agricoles supérieures a très vite baissé. On a en revanche calculé en 1991 que sa concentration dans les eaux souterraines ne connaîtrait un pic qu'en 2020 et qu'il y aurait toujours d'importantes quantités de ce produit chimique dans l'eau après 2050. **(Source : N. L. van der Noot)**

si la fécondité baisse, la population continue à croître pendant plusieurs dizaines d'années, car les jeunes arrivent peu à peu dans leur période de procréation. Bien que le nombre d'enfants par famille baisse, le nombre de familles augmente. Du fait de cet « élan démographique », si la fécondité de la population mondiale atteint partout le seuil de renouvellement des générations (soit en moyenne deux enfants par famille environ) en 2010, la population va continuer à augmenter jusqu'en 2060, puis elle va se stabiliser autour de 8 milliards d'individus.

Il existe bien d'autres temps de réaction dans le « monde réel ». On pourra ainsi puiser dans les ressources non renouvelables pendant des générations avant que leur épuisement n'ait de graves conséquences économiques. On ne peut pas non plus bâtir du

capital industriel du jour au lendemain, et une fois qu'il est mis en service, il a une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Une raffinerie de pétrole ne peut être ni facilement ni rapidement convertie en une usine de tracteurs ou un hôpital. Et la rendre plus efficiente et moins polluante prend du temps.

World3 intègre de nombreux temps de réaction dans ses boucles de rétroaction, dont tous ceux que nous venons de mentionner. Nous partons de l'hypothèse qu'il y a un délai entre l'émission de pollution et le moment où l'on remarque ses effets sur le système. Nous estimons à environ une génération le temps qu'il faut aux couples pour qu'ils aient pleinement confiance et prennent les décisions relatives à la taille de leur famille en fonction de la baisse de la mortalité infantile. Il faut normalement des décennies dans World3 pour que l'investissement soit réaffecté et que de nouvelles usines soient construites et tournent à plein régime afin de répondre à une pénurie de nourriture ou de services. Et il faut du temps pour qu'une terre recouvre sa fertilité ou pour que la pollution soit absorbée.

Les délais physiques les plus simples et les plus évidents suffisent à rendre improbable l'évolution sigmoïde et en douceur du système économique mondial. Du fait de l'arrivée tardive des signaux que la nature envoie concernant ses limites, le dépassement est inévitable en l'absence de limites qui s'auto-appliquent. Mais ce dépassement peut, en théorie, conduire soit à l'oscillation, soit à l'effondrement.

Le dépassement et l'oscillation

Si le signal d'alarme émis par les limites en direction de l'entité en expansion arrive avec retard, ou si la réaction à ce signal arrive avec retard, et si l'environnement ne s'érode pas lorsqu'il est soumis à un stress excessif, alors l'entité en expansion va dépasser sa limite quelque temps, se corriger, redescendre en dessous de sa limite, puis la dépasser à nouveau dans une série d'oscillations qui, généralement, aboutissent à un certain équilibre en deçà de la limite (figure 4-9c).

Le dépassement et l'oscillation ne peuvent se produire que si l'environnement subit des dommages limités durant les périodes de surcharge et peut les réparer suffisamment vite pour être totalement remis durant les périodes de sous-utilisation.

Les ressources renouvelables comme les forêts, les sols, les poissons et les eaux souterraines rechargeables peuvent s'éroder, mais elles sont aussi capables d'autorégénération. Elles peuvent se remettre d'une période d'usage abusif tant que celle-ci n'a pas été suffisamment forte ni longue pour que les dégâts causés à la source nutritive, au stock reproducteur ou à l'aquifère soient irréversibles. Moyennant du temps, de la terre, des semences et un climat approprié, une forêt peut renaître. Un stock de poisson peut se régénérer si son habitat et ses réserves de nourriture ne sont pas détruits. Les sols peuvent être reconstitués, surtout avec l'aide active des agriculteurs. L'accumulation de plusieurs types de pollutions peut être réduite si les mécanismes naturels d'absorption de la pollution par l'environnement n'ont pas été trop perturbés.

Voilà pourquoi le dépassement et l'oscillation sont un mode de comportement tout à fait possible en ce qui concerne notre système mondial. Ce comportement a déjà existé dans certaines régions vis-à-vis de certaines ressources. La Nouvelle-Angleterre, par exemple, a vécu à plusieurs reprises des périodes lors desquelles on construisait trop de scieries par rapport à ce que l'exploitation durable des forêts de la région pouvait fournir. À chaque fois que cela s'est produit, les stocks de bois commercial finissaient par être épuisés, les scieries devaient fermer, l'industrie attendait plusieurs dizaines d'années que la forêt repousse et la construction excessive de scieries reprenait. La pêcherie sur les côtes norvégiennes a vécu au moins un cycle d'épuisement du poisson ; l'État a alors racheté les bateaux de pêche et les a laissés à quai tant que les stocks de poisson ne se sont pas rétablis.

Dans le dépassement et l'oscillation, la période de déclin n'est pas facile à traverser. Elle peut être synonyme de temps difficiles pour les entreprises qui dépendent d'une ressource surexploitée

ou de santé précaire pour les populations exposées à des niveaux de pollution élevés. Il vaut donc mieux éviter les oscillations. Mais en règle générale, elles ne sont pas fatales à un système.

Le dépassement peut être catastrophique lorsque les dommages qu'il cause sont irréversibles. Personne ne peut plus rien faire une fois qu'une espèce s'est éteinte. Les combustibles fossiles disparaissent définitivement chaque fois qu'on en utilise. Il n'existe aucun mécanisme naturel qui rende inoffensifs certains polluants comme les matières radioactives. Lorsque le climat est perturbé de façon significative, les données géologiques montrent que les températures et le régime des précipitations ne reviendront pas à la normale dans un laps de temps significatif pour la société humaine. Même les ressources renouvelables et les processus d'absorption de la pollution peuvent ne jamais se rétablir s'ils ont été mis à contribution pendant trop longtemps ou de manière trop soutenue. Chaque fois que les forêts tropicales sont rasées d'une façon qui empêche leur repousse, que de l'eau de mer infiltre les aquifères, que les sols sont à ce point lessivés qu'il ne reste plus que le socle rocheux ou que l'acidité du sol est suffisamment modifiée pour que celui-ci rejette les métaux lourds qu'il contenait, la capacité de charge de la Terre est atteinte de façon définitive ou pour une durée qui paraît infinie aux êtres humains.

Le dépassement et l'oscillation ne sont donc pas le seul scénario susceptible de se produire à mesure que les humains approchent des limites de la croissance. On observe également le scénario qui suit.

Le dépassement et l'effondrement

Si le signal émis par la limite ou si la réaction arrivent avec retard, et si l'environnement est érodé de façon irréversible suite à un excès de stress, alors l'économie en expansion va dépasser sa capacité de charge, dégrader son stock de ressources et s'effondrer (figure 4-9d).

La conséquence du dépassement et de l'effondrement est un environnement en permanence appauvri et un niveau de vie

matériel bien plus bas que si l'environnement n'avait jamais subi un stress excessif.

La différence entre le dépassement-oscillation et le dépassement-effondrement tient à la présence de *boucles d'érosion* dans le système. Ce sont des boucles de rétroaction positives particulièrement nocives. En temps normal, elles sont inactives, mais lorsqu'une situation se dégrade, elles aggravent le processus en tirant le système vers le bas à un rythme sans cesse croissant.

Les pâturages du monde entier ont par exemple évolué en parallèle avec les herbivores tels que les buffles, les antilopes, les lamas ou les kangourous. Lorsque l'herbe est broutée par ces animaux, les tiges et les racines résiduelles puisent davantage d'eau et de nutriments dans le sol, si bien qu'une plus grande quantité d'herbe pousse. Le nombre d'herbivores est régulé par les prédateurs, les migrations saisonnières et les maladies. L'écosystème ne s'érode donc pas. Mais s'il n'y a plus de prédateurs, si les migrations sont perturbées ou si les terres sont victimes de surpâturage, la surpopulation de ruminants risque de manger l'herbe jusqu'à la racine, ce qui peut précipiter une rapide érosion.

Moins il y a de végétation, moins il y a de couvert sur le sol. Avec la disparition du couvert, le sol est emporté par le vent ou par les pluies. Moins il y a de sol, moins la végétation peut pousser. Et moins il y a de végétation, plus le sol s'érode, et ainsi de suite. La fertilité de la terre subit une spirale descendante jusqu'à ce que les anciens pâturages ne soient plus qu'un désert.

On compte plusieurs boucles d'érosion dans World3, parmi lesquelles :

- Lorsque les populations ont faim, elles cultivent la terre de façon plus intensive. Elles obtiennent davantage de nourriture à court terme, mais cela se fait aux dépens d'investissements à long terme dans l'entretien des sols. La fertilité de la terre diminue alors, entraînant avec elle la baisse de la production de nourriture.
- Lorsque surviennent des problèmes qui requièrent un accroissement de la production industrielle – cela peut être la lutte

contre la pollution qui nécessite des installations particulières ou le fait que les populations aient faim, ce qui nécessite plus d'intrants agricoles, ou encore une pénurie de ressources qui stimule la découverte et le traitement de nouveaux gisements – il arrive que les investissements soient alloués à la résolution immédiate de ces problèmes et non à l'entretien du capital industriel existant pour freiner sa dépréciation. Or si ce dernier décline, cela signifie qu'il y aura encore moins de production industrielle à l'avenir. Cette baisse de la production peut avoir pour effet de remettre l'entretien du capital à plus tard encore, ce qui ne fait qu'accroître la baisse du stock de capital industriel.

- Dans une économie affaiblie, il peut arriver que les services par habitant soient réduits. Si l'on diminue par exemple le financement de la planification familiale, le taux de natalité risque de s'élever. La population augmente alors, ce qui diminue un peu plus encore les services par habitant.
- Si les niveaux de pollution augmentent trop, ils peuvent nuire aux mécanismes d'absorption, ce qui réduit le taux d'assimilation de la pollution et accroît donc un peu plus encore son accumulation.

Cette dernière boucle, c'est-à-dire le fait que les mécanismes naturels d'assimilation de la pollution soient détériorés, est particulièrement insidieuse. C'est un phénomène pour lequel nous disposions de peu de preuves lors de la première conception de World3, il y a plus de 30 ans. À l'époque, nous avions surtout à l'esprit le rejet des pesticides dans l'eau, ce qui tuait les organismes qui normalement nettoient les déchets organiques, ou l'émission couplée dans l'air d'oxydes d'azote et de composés organiques volatiles dont l'interaction rend le smog photochimique encore plus nuisible.

Depuis, d'autres exemples de dégradation des mécanismes terrestres de contrôle de la pollution ont été mis en lumière. L'un d'eux est l'apparente faculté de certains polluants atmosphériques à court terme, comme le monoxyde de carbone, de détruire les

radicaux hydroxyles. Ces derniers entrent en temps normal en réaction avec le gaz à effet de serre qu'est le méthane et le détruisent. Mais lorsque l'atmosphère en contient moins du fait de la pollution de l'air, les concentrations en méthane augmentent. Si bien qu'en détruisant un mécanisme de lutte contre la pollution, la pollution atmosphérique à court terme peut aggraver le changement climatique à long terme[14].

Autre processus similaire : la capacité des polluants atmosphériques à affaiblir ou à tuer les forêts, portant ainsi atteinte à un puits de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Enfin, il y a l'effet de l'acidification, liée aux engrais et aux émissions industrielles, sur les sols. Lorsque les taux d'acidité sont normaux, les sols absorbent la pollution. Ils se lient à des métaux toxiques et les séquestrent, ce qui fait que ces derniers ne pénètrent ni dans les cours d'eau ni dans les eaux souterraines et pas non plus, donc, dans les organismes vivants. Mais ces liens sont rompus en cas d'acidification. W. M. Stigliani a décrit ce processus en 1991 :

> *Lorsque les sols s'acidifient, les métaux lourds toxiques, qui se sont accumulés et ont été stockés sur de longues périodes (disons de plusieurs dizaines d'années à un siècle), peuvent être mobilisés et s'infiltrer rapidement dans les eaux souterraines et de surface ou être absorbés par les plantes. L'acidification continue des sols européens du fait des dépôts d'acide est un véritable problème à cause de l'infiltration des métaux lourds*[15].

En dehors de celles que nous avons intégrées dans World3, il existe de nombreuses autres boucles de rétroaction positives dans le « monde réel » qui peuvent produire une rapide érosion. Nous avons déjà parlé de la possible érosion des systèmes physiques et biologiques. Une illustration d'une toute autre nature serait l'effon-

14. Voir « New Cause of Concern on Global Warming », *New York Times*, 12 février 1991.

15. W. M. Stigliani, « Chemical Time Bombs », *Options*, Laxenburg, Autriche, Institut international pour l'analyse de systèmes appliqués, septembre 1991.

drement de l'ordre social. Lorsque les élites d'un pays estiment qu'il est normal qu'il y ait de grandes différences de bien-être entre les citoyens, elles peuvent user de leur pouvoir pour engendrer d'importantes disparités de revenus entre elles et la majorité de la population. Cette inégalité peut être source de frustration, de colère et de protestations au sein de la classe moyenne. Les perturbations qui résultent de ces protestations peuvent conduire à la répression. L'utilisation de la force isole alors un peu plus les élites des masses et accentue chez les puissants la conviction morale qu'un fossé entre la majorité de la population et eux est largement justifié. L'écart entre les revenus augmente, la colère et la frustration aussi, ce qui peut déboucher sur une répression accrue. Et, au bout du compte, il peut y avoir révolution ou effondrement.

Il est difficile de quantifier quelque mécanisme érosif que ce soit, car l'érosion est un phénomène systémique qui implique l'interaction de multiples forces. Elle ne se produit qu'en période de stress, et quand arrive le stade où elle est indubitable, elle n'est pas facile à arrêter. Malgré ces incertitudes, on peut affirmer sans crainte que tout système porteur d'un processus d'érosion latent est susceptible de s'effondrer s'il connaît un excès de stress.

À l'échelle locale, le dépassement et l'effondrement sont visibles à travers les processus de désertification, d'épuisement des minerais et des eaux souterraines, d'empoisonnement des sols agricoles ou des forêts par des déchets toxiques à vie longue et d'extinction des espèces. Les fermes inhabitées, les villes minières désertées et les décharges industrielles à l'abandon sont toutes là pour attester la « véracité » d'un tel comportement du système. À l'échelle mondiale, le dépassement et l'effondrement peuvent se traduire par l'arrêt des grands cycles naturels qui régulent le climat, purifient l'air et l'eau, régénèrent la biomasse, préservent la biodiversité et transforment les déchets en substances nutritives. Lorsque nous avons publié nos résultats pour la première fois, en 1972, la majorité des individus considéraient que la perturbation par l'humain des processus naturels à l'échelle planétaire était inconcevable. Elle fait aujourd'hui la une des journaux,

constitue le thème de réunions scientifiques et se situe au cœur des négociations internationales[16].

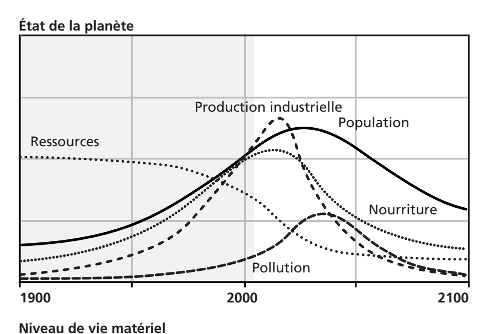
World3 : deux scénarios possibles

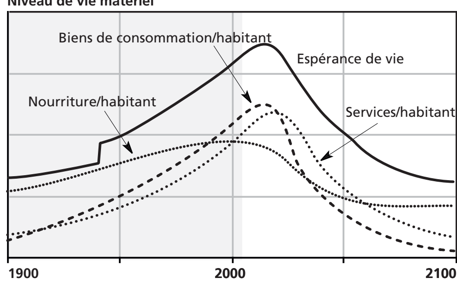
Dans l'univers simulé de World3, l'objectif premier est la croissance. La population de World3 ne cessera d'augmenter que lorsqu'elle sera très riche et son économie ne cessera son expansion que lorsqu'elle se heurtera aux limites. Leur usage excessif entraîne la baisse des ressources et leur détérioration. Les boucles de rétroaction qui informent cet univers sur ce qu'il doit faire intègrent un délai important et ses processus physiques ont une force d'inertie considérable. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que le comportement le plus probable de ce modèle soit le dépassement et l'effondrement.

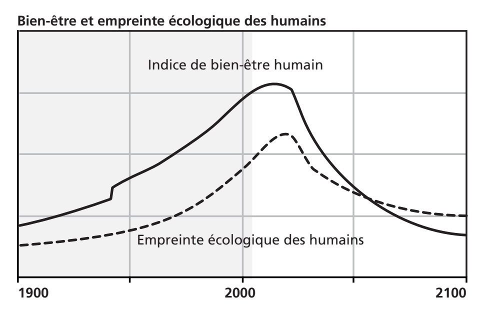
Les graphiques du Scénario 1, figure 4-11, montrent le comportement de World3 lorsqu'il fonctionne « tel quel », avec des chiffres que nous considérons comme décrivant de façon « réaliste » la situation moyenne qui a été celle de la seconde partie du XXe siècle et sans hypothèse technique ou politique qui sorte de l'ordinaire. En 1972, nous l'avions appelé le « scénario standard ». Nous ne le considérions pas comme le plus probable et nous ne l'avons en aucun cas présenté comme une prévision. Il représentait simplement un point de départ, un élément de comparaison. Mais beaucoup ont accordé plus d'importance à ce « scénario standard » qu'aux scénarios suivants. Afin que cela ne se reproduise plus,

16. Aux négociations et aux recherches concernant la destruction de la couche d'ozone, décrites dans le chapitre 5, et à celles concernant le changement climatique mondial, évoquées dans le chapitre 3, viennent s'ajouter des programmes de recherche internationaux de grande importance sur le « changement mondial » parrainés par le Conseil international des unions scientifiques (CIUS) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM), parmi lesquels l'International Geosphere-Biosphere Program (IGBP), le World Climate Research Program (WCRP) et l'International Human Dimensions Program (IHDP). Il existe également de nombreuses démarches nationales et régionales telles que l'U.S. Global Change Research Program.

FIGURE 4-11 – Scénario 1 : un point de repère







La société mondiale évolue classiquement, sans dévier de façon significative des politiques adoptées durant la majeure partie du XX[e] siècle. Population et production augmentent jusqu'à ce que leur croissance soit stoppée par des ressources non renouvelables de plus en plus inaccessibles. Des investissements toujours plus importants sont donc requis pour entretenir le flux de ressources. Puis, le manque de fonds d'investissement dans les autres secteurs de l'économie conduit à une baisse de la production de biens industriels et de services. Cette baisse s'accompagne d'une diminution de la nourriture et des services, ce qui réduit l'espérance de vie et augmente le taux de mortalité.

nous l'appellerons simplement « point de repère » et attribuerons des chiffres à chaque scénario. Celui-ci est donc le Scénario 1.

Dans ce scénario, la société suit une trajectoire très classique aussi longtemps que possible sans introduire de changement politique majeur. Elle trace le cours de l'histoire tel que nous l'avons connu tout au long du XXe siècle. La production de nourriture, de biens industriels et de services sociaux augmente en fonction de la disponibilité de capital pour répondre à d'évidents besoins. Aucun effort démesuré n'est fait pour réduire la pollution, protéger les ressources ou protéger la terre, sauf dans la mesure où cela a un sens économique immédiat. Ce monde simulé tente de mener toute la population à la transition démographique et de lui faire connaître une économie industrielle prospère. Dans le monde du Scénario 1, les soins de santé et le contrôle des naissances deviennent très répandus à mesure que le secteur tertiaire se développe. Avec l'essor du secteur primaire, ce monde utilise davantage d'intrants agricoles et obtient de meilleurs rendements. Il émet plus de polluants, nécessite plus de ressources non renouvelables et obtient une production plus importante grâce au déploiement du secteur industriel.

La population dans le Scénario 1 passe de 1,6 milliard d'habitants lors de l'année de simulation 1900 à 6 milliards en 2000 et à plus de 7 milliards en 2030. La production industrielle totale est multipliée par 30 ou presque entre 1900 et 2000, puis par 10 jusqu'en 2020. Entre 1900 et 2000, seuls 30 % du stock total de ressources non renouvelables de la planète sont utilisées ; il en reste donc plus de 70 %. Les niveaux de pollution en l'an 2000 commencent à peine à augmenter de façon importante et sont de 50 % supérieurs à ceux de 1990. Les biens de consommation par habitant en 2000 ont augmenté de 15 % par rapport à 1990 ; ils ont été multipliés par 8 ou presque par rapport à 1900[17].

17. L'expression biens de consommation par habitant représente la part de la production industrielle qui est consacrée aux biens de consommation tels que les voitures, les appareils électriques et les vêtements. Elle représente

Quand on regarde la moitié gauche des graphiques du Scénario 1, on ne voit l'évolution des courbes que jusqu'en 2000 et le monde tel qu'il est simulé semble se porter à merveille. L'espérance de vie s'allonge, le nombre de services et de biens par habitant augmente, tout comme la production totale de nourriture et la production industrielle. Le bien-être humain moyen ne fait que progresser. Quelques nuages se profilent cependant à l'horizon : les niveaux de pollution augmentent, ainsi que l'empreinte écologique des humains. Et la quantité de nourriture par habitant stagne. Mais dans l'ensemble, le système continue à croître et très peu d'éléments annoncent les bouleversements imminents.

Puis, tout à coup, alors que le XXIe siècle est entamé depuis quelques décennies à peine, la croissance de l'économie s'arrête et s'inverse de façon assez soudaine. Cette discontinuité est principalement due à l'augmentation rapide du coût des ressources non renouvelables. Cette hausse se répercute sur tous les secteurs économiques et se traduit par des capacités d'investissement de plus en plus rares. Examinons le processus.

En 2000, dans notre simulation, les ressources non renouvelables résiduelles qu'il restait à extraire du sol auraient duré 60 ans si la consommation s'était poursuivie sur la base de cette année-là. Aucune limite sérieuse en matière de ressources n'était alors en vue. Mais en 2020, les ressources résiduelles n'en ont plus que pour 30 ans. Pourquoi ce raccourcissement de l'échéance survient-il aussi vite ? Il survient parce que la croissance de la

---

environ 40 % de la production totale. Elle n'inclut pas la nourriture, les services ni l'investissement qui font l'objet de calculs séparés. Dans le modèle, les biens de consommation, la production industrielle et les services représentent des choses physiques et tangibles, mais ils sont mesurés en dollars, car c'est la seule mesure utilisée en économie. Dans le modèle original, nous avions tout calculé en dollars de 1968 et nous ne voyons pas de raison de modifier cela étant donné que nous nous intéressons avant tout aux mesures relatives et non absolues du bien-être. Mais puisqu'il est difficile pour nos lecteurs, plusieurs dizaines d'années plus tard, d'avoir affaire à des mesures exprimées en dollars de 1968 (qui valaient à peu près quatre fois ceux de 2000), nous nous limitons dans ce livre à des termes économiques relatifs.

production industrielle et de la population pèse sur la consommation de ressources dont les stocks baissent. Entre 2000 et 2020, en effet, la population augmente de 20 % et la production industrielle, de 30 %. Pendant ces 20 années dans le Scénario 1, la population et les usines consomment à peu près la même quantité de ressources non renouvelables que la planète tout entière durant le siècle précédent ! Et, bien évidemment, il faut davantage de capital pour trouver, extraire et traiter les ressources non renouvelables résiduelles puisque le monde tel que simulé dans ce scénario s'efforce sans relâche d'alimenter toujours plus de croissance.

Les ressources non renouvelables devenant plus difficiles à obtenir dans ce scénario, il faut mobiliser du capital pour en produire davantage. Il en reste donc moins à investir pour soutenir l'importante production agricole et assurer la poursuite de la croissance industrielle. Finalement, vers 2020, les investissements dans le capital industriel ne parviennent plus à compenser la dépréciation. (Il s'agit là d'investissements et de dépréciation *physiques* ; en d'autres termes, d'usure et d'obsolescence et non de dépréciation monétaire au sens comptable.) La conséquence de tout cela est le déclin industriel, qui est difficile à éviter en pareil cas puisque l'économie est obligée de continuer à investir dans le secteur des ressources. Si elle arrêtait, la pénurie de matières et de combustibles freinerait encore plus rapidement la production industrielle.

L'entretien et la maintenance sont donc suspendus, les équipements industriels se détériorent et entraînent la baisse de la production industrielle, pourtant nécessaire à la croissance des stocks de capital et des taux de production dans les autres secteurs de l'économie. Au bout du compte, le déclin du secteur industriel provoque celui des secteurs tertiaire et primaire qui sont dépendants de la production industrielle. Le déclin de l'industrie a un impact particulièrement fort sur l'agriculture dans le Scénario 1, car la surexploitation avant l'an 2000 a déjà quelque peu entamé la fertilité de la terre. Résultat : la production de nourriture est essentiellement maintenue en compensant cette

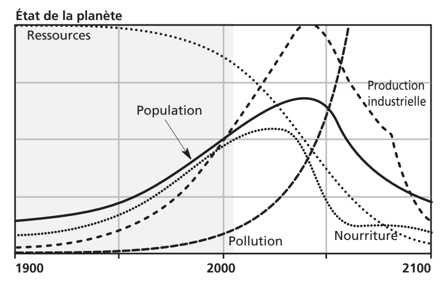
dégradation de la terre au moyen d'intrants industriels comme les engrais, les pesticides et les dispositifs d'irrigation. La situation s'aggrave avec le temps, car la population continue à croître du fait des décalages inhérents à sa structure par âges et au processus d'ajustement social aux normes en matière de fécondité. Pour finir, vers 2030, la population atteint un pic, puis commence à diminuer car le taux de mortalité augmente du fait du manque de nourriture et de services de santé. L'espérance de vie moyenne, qui était de 80 ans en 2010, baisse, elle aussi.

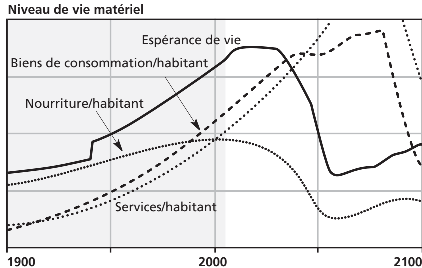
Ce scénario décrit une « crise des ressources non renouvelables ». *Ce n'est pas une prévision*. Il n'a pas pour but de prévoir les valeurs précises des variables du modèle ni la chronologie exacte des événements. Nous ne pensons pas qu'il s'agisse du scénario le plus probable dans le « monde réel ». Nous allons d'ailleurs en présenter d'autres, un peu plus bas et dans les chapitres 6 et 7. La seule affirmation que nous pouvons formuler au sujet du Scénario 1 est qu'il décrit le probable *mode de comportement général* du système à la condition que les politiques qui influencent la croissance économique et démographique restent identiques à celles qui ont prévalu durant la dernière partie du XXe siècle, *à la condition que* les technologies et les valeurs continuent à évoluer d'une façon représentative de cette époque et *à la condition que* les chiffres incertains du modèle soient à peu près corrects.

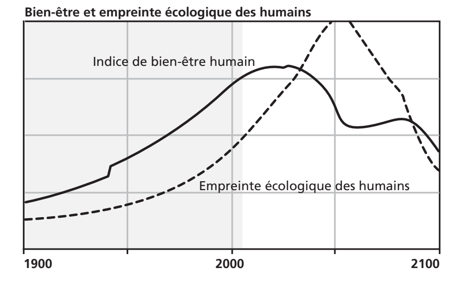
Et si nos hypothèses et nos chiffres n'étaient pas les bons ? Quelle différence cela ferait-il si, par exemple, il reste en fait deux fois plus de ressources non renouvelables à découvrir dans le sol que ce que nous avons supposé dans le Scénario 1 ? Le résultat est l'objet du Scénario 2, figure 4-12.

Comme on peut le voir, l'épuisement des ressources intervient nettement plus tard dans cette simulation que dans la précédente, ce qui permet à la croissance de se poursuivre plus longtemps. L'expansion continue 20 ans de plus, soit assez longtemps pour multiplier à nouveau par deux la production industrielle et la consommation de ressources. La population, elle aussi, se développe plus longtemps, atteignant un pic de plus de 8 milliards

FIGURE 4-12 – Scénario 2 : Des ressources non renouvelables plus abondantes







Si on multiplie par deux par rapport au Scénario 1 la quantité de ressources non renouvelables disponibles et si, en outre, on formule le postulat que les progrès accomplis par les technologies d'extraction vont permettre de repousser l'augmentation des coûts, l'industrie peut se développer 20 ans de plus. La population, dont le niveau de consommation s'élève considérablement, connaît un pic en 2040 avec 8 milliards d'individus. Mais la pollution connaît elle aussi une montée en flèche (la courbe sort du graphique !), ce qui fait baisser les rendements de la terre et nécessite des investissements considérables pour soigner l'agriculture. La population finit par décliner du fait de pénuries alimentaires et d'effets néfastes de la pollution sur la santé.

d'habitants en 2040, selon notre simulation. Mais à part ces prolongations, le comportement général de ce modèle reste le dépassement et l'effondrement. Ce dernier est cette fois dû avant tout à la forte pollution de l'environnement à l'échelle mondiale.

L'accroissement de la production industrielle provoque la montée en flèche de la pollution ; dans le Scénario 2, celle-ci atteint un pic 50 ans plus tard environ que dans le Scénario 1, mais elle est 5 fois plus importante. Cette augmentation est due en partie à des taux de production de pollution plus élevés et aussi au fait que les processus d'assimilation de la pollution fonctionnent moins bien. Au moment du pic, vers 2090, la durée de vie moyenne des polluants dans l'environnement est plus de trois fois plus longue qu'en 2000. L'usage intensif d'engrais, de pesticides et d'autres intrants agricoles accentue davantage encore l'empreinte écologique.

La pollution se répercute très fortement sur la fertilité des terres, qui baisse de façon spectaculaire durant la première moitié du XXIe siècle dans le Scénario 2. Et malgré des investissements accrus pour compenser cette baisse, la restauration de la fertilité ne suffit pas à empêcher que les rendements et la production de nourriture ne dégringolent après 2030. D'où une augmentation du taux de mortalité. Un surcroît de capital est alloué à l'agriculture dans le vain espoir de stopper la faim et, pour finir, le secteur industriel arrête de se développer faute de réinvestissements.

Le Scénario 2 décrit une « crise mondiale due à la pollution ». Durant la première moitié du XXIe siècle, les niveaux de pollution augmentent assez pour nuire à la fertilité des sols. Pareil scénario pourrait se produire dans le « monde réel » à travers la contamination des sols par les métaux lourds ou les produits chimiques persistants, le changement climatique qui modifierait trop vite les conditions de croissance des plantes pour que les agriculteurs aient le temps de s'y adapter ou l'augmentation des radiations ultraviolettes suite à la détérioration de la couche d'ozone. La fertilité de la terre ne baisse que légèrement entre 1970 et 2000, mais elle chute de 20 % entre 2000 et 2030, et en 2060, elle n'est

plus que l'ombre de ce qu'elle était en 2000. Parallèlement à cela, on enregistre une forte érosion. La production totale de nourriture se met à baisser en 2030, si bien que l'économie consacre désormais ses investissements au secteur agricole pour compenser cette baisse. Mais les dégâts causés par la pollution sont trop importants et la production de nourriture ne se rétablit pas. Dans la seconde moitié du XXIe siècle, non seulement la nourriture se raréfie, mais la pollution atteint de tels niveaux qu'elle fait chuter l'espérance de vie moyenne. L'empreinte écologique des humains est colossale, jusqu'à ce que l'effondrement la rabaisse à des valeurs proches de celles du siècle précédent.

Lequel des deux scénarios, le 1 ou le 2, est le plus probable ? S'il existait une réponse scientifique à cette question, elle s'appuierait sur les preuves concernant la « véritable » quantité de ressources non renouvelables qu'il reste à découvrir. Mais nous ne pouvons pas connaître cette quantité avec certitude. Il reste de toute façon un grand nombre de données incertaines et de changements politiques ou techniques à tester. Ils feront l'objet des chapitres 6 et 7. Mais ce que World3 nous dit jusqu'à présent, c'est que le système modélisé est menacé par le dépassement et l'effondrement. D'ailleurs, sur les milliers de simulations que nous avons effectuées au fil des ans, le dépassement et l'effondrement ont de loin été les conséquences les plus fréquentes, sans pour autant être inévitables. Les raisons de cet état de fait sont à présent claires.

Pourquoi le dépassement et l'effondrement ?

Une population et une économie sont en dépassement lorsqu'elles puisent des ressources et émettent des polluants à un rythme non soutenable, mais ne se trouvent pas encore dans la situation où le stress qu'elles imposent aux systèmes vitaux est suffisamment fort pour qu'elles soient contraintes de réduire leur consommation ou leurs émissions. Autrement dit, l'humanité est en dépassement lorsque son empreinte écologique se situe au-dessus du niveau

soutenable, mais n'est pas suffisante pour la pousser à déclencher les changements qui vont la faire baisser.

Le dépassement s'explique par un retard dans la réaction. Les décideurs d'un système n'obtiennent pas immédiatement l'information selon laquelle les limites ont été dépassées, ou ne la croient pas ou n'en tiennent pas compte. Le dépassement est possible, car des ressources dans lesquelles on peut puiser ont été accumulées. Vous pouvez ainsi dépenser chaque mois plus que vous ne gagnez, du moins pendant un certain temps, si vous avez mis de l'argent de côté à la banque. Vous pouvez vider une baignoire plus vite qu'elle ne se remplit du moins jusqu'à ce que vous ayez épuisé l'eau présente au départ dans cette même baignoire. Vous pouvez abattre dans une forêt plus d'arbres qu'il n'en pousse à la condition que vous démarriez avec un peuplement d'arbres qui soient présents depuis plusieurs dizaines d'années. Vous pouvez pratiquer le surpâturage ou la surpêche si vous avez au départ accumulé suffisamment de fourrage et de stocks de poisson qui n'étaient pas exploités jusque-là. Plus le stock de départ est important, plus le dépassement peut durer longtemps. Si une société ne considère que les signaux relatifs à la disponibilité des stocks et non ceux portant sur la vitesse de reconstitution de ces derniers, elle est condamnée au dépassement.

L'inertie s'ajoute au retard des signaux et elle constitue une autre source de retard dans la réponse apportée à ces mêmes signaux. Étant donné le temps qu'il faut à une forêt pour repousser, à une population pour vieillir, à des polluants pour s'infiltrer dans l'écosystème, à des eaux polluées pour redevenir propres, aux machines pour se déprécier, ou aux individus pour s'instruire ou se recycler, le système ne peut pas changer du jour au lendemain, même après avoir perçu et accepté l'existence d'un problème. Pour se diriger correctement, un système et sa force d'inertie doivent regarder loin devant, du moins aussi loin que son inertie le lui permet. Plus un bateau met de temps à virer, plus son radar doit porter loin. Les systèmes politiques et économiques de la planète ne regardent pas assez loin devant eux.

Enfin, le dernier acteur du dépassement est la poursuite de la croissance. Lorsque vous conduisez une voiture dont les vitres sont embuées ou les freins défectueux, la première chose que vous faites pour éviter le dépassement des limites est de *ralentir*. Vous n'allez certainement pas continuer à accélérer. Il est possible de gérer les temps de réaction à partir du moment où le système n'avance pas trop vite pour pouvoir recevoir les signaux et y réagir avant d'atteindre la limite. L'accélération continuelle conduit tout système, aussi intelligent, prévoyant et bien conçu soit-il, à ne pas pouvoir réagir à temps. Même une voiture parfaite et un conducteur irréprochable courent des risques à des vitesses élevées. Plus la croissance est rapide, plus le dépassement est important et plus la chute est vertigineuse. Or les systèmes politiques et économiques de la planète ont pour tâche d'atteindre le rythme de croissance le plus soutenu possible.

Ce qui fait qu'on passe du dépassement à l'effondrement est l'érosion, à laquelle s'ajoutent les non-linéarités. L'érosion est un stress qui s'amplifie si on n'y remédie pas rapidement. Les non-linéarités comme celles présentées par les figures 4-2 et 4-7 correspondent à des *seuils* au-delà desquels le comportement d'un système change brusquement. Un pays peut exploiter un minerai de cuivre jusqu'à des teneurs de plus en plus faibles, mais en dessous d'une certaine teneur, les coûts d'exploitation grimpent subitement. Les sols peuvent s'éroder sans que cela ait d'incidence sur les rendements des récoltes jusqu'à ce qu'ils deviennent moins profonds que la zone radiculaire des cultures. À partir de là, toute érosion supplémentaire débouche rapidement sur une désertification. L'existence de seuils rend les conséquences des temps de réaction encore plus graves. Pour reprendre l'exemple de la voiture dont les vitres sont embuées et les freins défectueux, si vous abordez des virages serrés, vous allez devoir ralentir encore plus.

Tout système constitué d'une population, d'une économie et d'un environnement, qui a besoin d'un temps de réaction et souffre d'une lenteur physique, qui est confronté à des seuils et à

des mécanismes érosifs et qui se développe rapidement, est, au sens strict du terme, *ingérable*. Ses technologies auront beau être extraordinaires, son économie, parfaitement efficiente et ses dirigeants, brillants, il ne pourra éviter les dangers. S'il s'évertue à accélérer, il dépassera les limites.

Par définition, le dépassement veut que les signaux retardés émanant de l'environnement ne soient pas suffisamment forts pour contraindre un système à stopper sa croissance. Comment une société peut-elle dès lors déterminer si elle est en dépassement ? La baisse des stocks de ressources et l'élévation des niveaux de pollution sont les premiers symptômes. En voici d'autres :

- Capital, ressources et main-d'œuvre sont redirigés vers des activités compensant la perte de services gratuitement fournis jusque-là par la nature (par exemple le traitement des eaux usées, la purification de l'air et de l'eau, le contrôle des inondations, la lutte phytosanitaire, la restauration des substances nutritives du sol, la pollinisation ou la protection des espèces).
- Capital, ressources et main-d'œuvre ne sont plus consacrés à la fabrication de produits finis, mais à l'exploitation de ressources plus rares, plus éloignées, plus profondément enfouies ou plus éparses.
- Des technologies sont inventées pour exploiter des ressources de moins bonne qualité, de plus petite taille, plus éparses et présentant moins de valeur, car celles qui étaient de meilleure qualité ont disparu.
- Les mécanismes naturels de lutte contre la pollution fonctionnent moins bien ; les niveaux de pollution augmentent.
- La dépréciation du capital l'emporte sur l'investissement et son entretien est ajourné, si bien que les stocks de capital se détériorent et tout particulièrement les infrastructures de longue durée.
- Les secteurs militaire et industriel demandent plus de capital, de ressources et de main-d'œuvre pour avoir accès à des ressources, les mettre en sécurité et les défendre ; ces ressources

se concentrent de plus en plus dans un nombre toujours plus restreint de régions, lesquelles sont de plus en plus éloignées et de plus en plus dangereuses.
- Les investissements dans les services bénéficiant aux humains (éducation, soins de santé, logement) sont ajournés pour satisfaire des besoins immédiats en matière de consommation, d'investissement ou de sécurité, ou pour rembourser les dettes.
- Les dettes représentent un pourcentage croissant de la production réelle annuelle.
- Les objectifs en matière de santé et d'environnement s'érodent.
- Les conflits augmentent, surtout ceux qui portent sur les sources et les exutoires.
- Les schémas de consommation évoluent, car la population n'a plus les moyens d'acheter ce qu'elle veut et, à la place, se tourne vers ce qu'elle peut se permettre d'acheter.
- Le respect envers les institutions publiques décline, car elles sont de plus en plus utilisées par les élites pour protéger ou augmenter leur part de ressources, elles-mêmes en déclin.
- Le désordre des systèmes naturels s'accentue avec des catastrophes « naturelles » plus fréquentes et plus graves du fait d'une moindre résilience du système environnemental.

Avez-vous observé l'un de ces symptômes dans le « monde réel » ? Si c'est le cas, vous devez soupçonner votre société d'être à un stade avancé de dépassement.

Si une période de dépassement n'est pas obligatoirement suivie d'un effondrement, il faut toutefois prendre des mesures rapides et énergiques pour éviter ce dernier. Les ressources doivent tout de suite être protégées et leur consommation, drastiquement réduite. Les niveaux excessifs de pollution doivent être abaissés et les taux d'émission doivent redescendre à un niveau soutenable. Il ne sera pas forcément nécessaire de faire baisser la population, le capital ou le niveau de vie. Ce qui doit en revanche diminuer rapidement sont les flux de matière et d'énergie. En d'autres termes, l'empreinte écologique de l'humanité doit être

réduite. Heureusement, si l'on peut dire, l'économie mondiale actuelle engendre un tel gâchis et se caractérise par une telle inefficience que le potentiel de réduction de notre empreinte est énorme et que nous pouvons, ce faisant, garder la même qualité de vie, voire l'améliorer.

Voici, pour résumer, les présupposés qui sont au centre de World3 et qui font que le système tend vers le dépassement et l'effondrement. *Si vous n'êtes pas d'accord avec notre modèle, notre théorie, notre ouvrage ou nos conclusions, voici les points que vous contestez* :

- La croissance de l'économie est considérée comme souhaitable ; elle est au centre de notre système politique, mental et culturel. La croissance de la population et celle de l'économie, quand elles se produisent, ont tendance à être exponentielles.
- Il existe des limites physiques aux sources de matière et d'énergie dans lesquelles puisent la population et l'économie, tout comme il existe des limites aux exutoires qui absorbent les déchets de l'activité humaine.
- La population et l'économie, en expansion, reçoivent des signaux sur ces limites physiques, signaux qui sont déformés, bruyants, retardés, confus ou niés. Les réactions à ces signaux sont tardives.
- Les limites du système sont non seulement finies, mais elles peuvent s'éroder si elles subissent un excès de stress ou sont surexploitées. Il existe en outre de puissantes non-linéarités, des seuils au-delà desquels les dégâts s'aggravent rapidement et peuvent être irréversibles.

Cette énumération des causes du dépassement et de l'effondrement permet de déterminer la liste des moyens de les éviter. Pour rendre le système soutenable et gérable, il faut prendre les mêmes caractéristiques structurelles et les inverser :

- La croissance de la population et du capital doit être ralentie et finalement arrêtée ; cette décision doit être prise par les

humains afin d'anticiper les problèmes à venir et non être une réaction aux signaux de limites externes qui sont déjà dépassées.

- Les flux d'énergie et de matière doivent être réduits grâce à l'augmentation considérable de l'efficience du capital. Autrement dit, l'empreinte écologique doit diminuer grâce à la dématérialisation (moindre consommation d'énergie et de matière pour le même résultat), à une plus grande équité (redistribution par les riches aux pauvres des avantages tirés de l'utilisation de l'énergie et de la matière) et au mode de vie (réduction de la demande ou orientation de la consommation vers des biens et des services ayant moins d'impacts négatifs sur l'environnement physique).
- Les sources et les exutoires doivent être protégés et, partout où c'est possible, restaurés.
- Les signaux doivent être améliorés et les réactions, accélérées ; la société doit regarder plus loin devant elle et déterminer ses actions en fonction des coûts et des avantages à long terme.
- L'érosion doit être évitée et, partout où elle est déjà en place, le processus doit être ralenti puis inversé.

Dans les chapitres 6 et 7, nous verrons comment ces changements peuvent modifier la tendance au dépassement et à l'effondrement que présente World3 et, comme nous le pensons et l'espérons, comment ils peuvent modifier le monde en général. Mais avant cela, dans le chapitre 5, nous allons faire une courte digression pour vous raconter une histoire qui illustre tous les principes dynamiques que nous avons exposés dans ce chapitre. Une histoire qui rime avec espoir.

CHAPITRE 5

L'histoire de la couche d'ozone ou la preuve qu'il est possible de redescendre en deçà des limites

Nous nous retrouvons d'une certaine manière embarqués dans une expérience à grande échelle à travers laquelle nous modifions la composition chimique de la stratosphère, alors même que nous ne savons pas avec précision à quelles conséquences biologiques et météorologiques nous attendre.

– F. Sherwood Rowland, 1986

Dans ce chapitre, nous vous proposons une histoire exemplaire qui relate le dépassement d'une limite importante, l'observation des conséquences de ce dépassement, puis la lutte, couronnée de succès, pour ramener l'activité humaine à des niveaux soutenables. Cette histoire traite de la capacité limitée de la couche d'ozone stratosphérique à absorber ces produits chimiques fabriqués par l'homme que sont les chlorofluorocarbones (CFC)[1]. Il faudra attendre plusieurs dizaines d'années avant que

1. Un certain nombre de substances chimiques contenant du chlore et du brome peuvent éroder la couche d'ozone stratosphérique : le bromure de méthyle, un « fumigant » du sol, le tétrachlorure de carbone, un solvant détachant, les halons pour la lutte contre les incendies, ainsi que d'autres. Mais la principale menace vient des CFC, une famille de composés contenant du fluor,

le dernier chapitre de cette histoire ne soit écrit, mais ce qui s'est passé jusqu'à présent est porteur d'espoir. Cela montre que les humains et leurs institutions, malgré les erreurs des premiers, peuvent se mettre d'accord à l'échelle internationale, diagnostiquer un cas de dépassement, puis concevoir des solutions et les mettre en œuvre. Dans le cas présent, le sacrifice que la société humaine doit faire pour accepter la nécessité de vivre au sein de certaines limites est relativement mince.

Les principales étapes de cette histoire qui a trait à la couche d'ozone sont les suivantes : les scientifiques ont d'abord lancé les premiers avertissements concernant la disparition de la couche d'ozone, puis ont organisé des recherches poussées au-delà des frontières politiques. Mais ils n'ont pu le faire qu'après être parvenus à se débarrasser de leurs propres œillères et à dépasser leur inexpérience des processus politiques. Les consommateurs se sont rapidement organisés pour inverser une tendance dangereuse, mais leurs seules actions n'ont pas suffi à apporter une solution durable au problème. États et entreprises ont d'abord traîné les pieds et émis des doutes, puis certains se sont distingués en faisant preuve de courage et d'altruisme. Les défenseurs de l'environnement ont été classés dans la catégorie « alarmistes invétérés », mais il se trouve qu'en l'espèce, ils ont en fait sous-estimé le problème.

Les Nations Unies ont montré à cette occasion leur faculté à transmettre une information cruciale dans le monde entier et à offrir un terrain neutre et une aide précieuse, les pays de la planète se débattant avec un problème dont le caractère international était incontestable. Les pays en développement ont trouvé dans cette crise un nouveau moyen de faire avancer leur cause, refusant de coopérer sans le soutien technique et financier qui leur faisait terriblement défaut.

---

de l'hydrogène et du chlore. Ce sont les CFC qui font l'objet du plus grand nombre de recherches et ils sont au centre de la majorité des démarches internationales de contrôle. C'est donc sur eux que nous allons nous attarder.

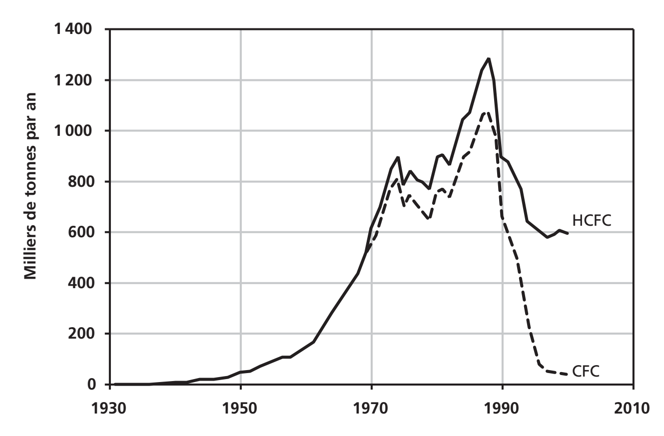
Les pays du monde entier ont fini par reconnaître qu'ils avaient dépassé une limite de première importance. Discrètement, à reculons, ils ont accepté de renoncer à toute une gamme de produits industriels lucratifs et utiles. Ils l'ont fait avant que des dégâts économiques, biologiques ou humains ne soient enregistrés et avant que les certitudes du côté des scientifiques ne soient entières. Ils ont sans doute agi à temps.

L'essor

Inventés en 1928, les chlorofluorocarbones (CFC) comptent parmi les composés les plus utiles jamais synthétisés par l'humain. Ils ne semblent pas nocifs aux êtres vivants, sans doute parce qu'ils sont chimiquement très stables. Ils ne brûlent pas, ne réagissent pas au contact d'autres substances et ne corrodent pas les matériaux. Leur conductivité thermique est basse, ce qui en fait d'excellents isolants en tant qu'agents d'expansion dans les mousses de matière plastique utilisées pour les gobelets pour boissons chaudes, les boîtes pour hamburgers ou l'isolation murale. Certains CFC s'évaporent et se recondensent à température ambiante, une propriété qui en fait de parfaits agents de refroidissement pour les réfrigérateurs et les climatiseurs. (On utilise souvent leur nom commercial, fréon, pour parler d'eux dans ce secteur). Les CFC sont de bons solvants qui servent à nettoyer les métaux, qu'il s'agisse des micro-espaces d'un circuit imprimé ou des rivets servant à l'assemblage d'un avion. Leur fabrication ne coûte pas cher et on peut s'en débarrasser en toute sécurité – c'est du moins ce que tout le monde pensait – soit en les rejetant dans l'atmosphère sous forme gazeuse, soit en enfouissant les produits qui en contiennent dans des décharges.

Comme le montre la figure 5-1, la production mondiale de CFC a progressé de plus de 11 % entre 1950 et 1975, doublant tous les six ans ou presque. Au milieu des années 1980, l'industrie en fabriquait un million de tonnes par an et rien qu'aux États-Unis, les CFC agissaient en tant que réfrigérants dans 100 millions de

FIGURE 5-1 – Production mondiale de chlorofluorocarbones



La production de CFC a rapidement augmenté jusqu'en 1974, date à laquelle sont parus les premiers articles mentionnant leur effet sur la couche d'ozone. La baisse qui est alors survenue était due au militantisme environnemental contre les bombes aérosol contenant des CFC, bombes qui ont été interdites aux États-Unis en 1978. Après 1982, le développement d'autres usages des CFC a entraîné une hausse temporaire de la production. Celle-ci a entamé sa chute en 1990 lorsque l'interdiction internationale des CFC est entrée en vigueur. Les HCFC sont toujours autorisés en tant que produits de remplacement ; on a prévu d'échelonner leur interdiction entre 2030 et 2040. **(Source : Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study)**

réfrigérateurs, 30 millions de congélateurs, 45 millions de climatiseurs domestiques, 90 millions de climatisations pour voitures et dans des centaines de milliers de groupes frigorifiques de restaurants, de supermarchés et de camions frigorifiques[2]. Les Nord-Américains et les Européens en utilisaient en moyenne

2. Arjun Makhijani, Annie Makhijani et Amanda Bickel, *Saving Our Skins : Technical Potential and Policies of the Elimination of Ozone-Depleting Chlorine Compounds*, Washington, DC, Environmental Policy Institute et Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement, septembre 1988. Disponible auprès de l'Environmental Policy Institute, 218 O Street SE, Washington, DC 20003, États-Unis.

0,9 kg par an. En Chine ou en Inde, ce chiffre descendait à moins de 0,03 kg[3]. Pour un grand nombre d'entreprises chimiques d'Amérique du Nord, d'Europe, de Russie et d'Asie, les CFC représentaient une importante source de revenus et ils étaient les composantes essentielles des processus de production de milliers d'entreprises.

La limite

Le héros de notre histoire est un gaz invisible appelé ozone et constitué de trois atomes d'oxygène (O_3), par opposition à l'oxygène classique qui se compose de seulement deux atomes d'oxygène (O_2). L'ozone est si réactif qu'il attaque et oxyde presque tout ce avec quoi il entre en contact. La basse atmosphère lui offre une importante quantité de particules et de surfaces avec lesquelles il peut entrer en réaction. Les tissus végétaux et les poumons humains l'intéressent tout particulièrement. À proximité de la surface terrestre, l'ozone est un polluant atmosphérique destructeur mais à vie courte. Plus haut dans l'atmosphère, en revanche, les molécules d'ozone sont relativement seules si bien qu'elles ont une durée de vie assez longue : de 50 à 100 ans. De l'ozone se forme en permanence dans la stratosphère grâce à l'action des rayons solaires avec l'oxygène. C'est ainsi qu'une « couche d'ozone » s'est formée à une distance comprise entre 9 et 30 km au-dessus de la surface de la Terre.

La couche d'ozone n'est riche de ce gaz que par comparaison avec sa rareté partout ailleurs dans l'atmosphère : seule une molécule sur 100 000 y est faite d'ozone. Mais cette concentration est suffisante pour absorber la majorité du spectre ultraviolet particulièrement dangereux appelé UVB et envoyé par le rayonnement solaire (voir figure 5-2). Ce rayonnement est constitué d'une pluie de petites bulles d'énergie à qui leur fréquence permet d'attaquer les molécules organiques, c'est-à-dire celles dont toute vie est faite

3. *Ibid.*

et parmi lesquelles figure l'ADN, porteur du code qui préside à la reproduction de la vie. La couche d'ozone est donc un voile très fin, mais d'une importance cruciale.

Lorsqu'un organisme vivant est touché par des UVB, il peut développer un cancer et on sait depuis longtemps que les UVB provoquent des cancers de la peau chez les animaux de laboratoire. Tous les cancers de la peau ou presque dont sont victimes les êtres humains touchent des parties du corps qui ont été exposées au rayonnement solaire. Ils touchent tout particulièrement les personnes à la peau claire qui passent beaucoup de temps à l'extérieur. L'Australie a le taux de cancers de la peau le plus élevé au monde : au taux d'incidence actuel, la moitié des habitants de ce pays devraient développer un cancer de la peau au cours de leur vie. Le type de cancer de la peau le plus dangereux, le mélanome malin, est le cancer le plus répandu chez les Australiens âgés de 15 à 44 ans[4]. Et selon les scientifiques, toute diminution de 1 % de la couche d'ozone entraîne une augmentation de 2 % des UVB à la surface de la Terre, ce qui accroît de 3 à 6 % l'incidence des cancers de la peau[5].

Les UVB sont dangereux à double titre pour les humains : non seulement ils peuvent provoquer des cancers, mais ils peuvent également porter atteinte à la faculté qu'a notre système immunitaire de combattre le cancer, l'herpès et d'autres maladies infectieuses.

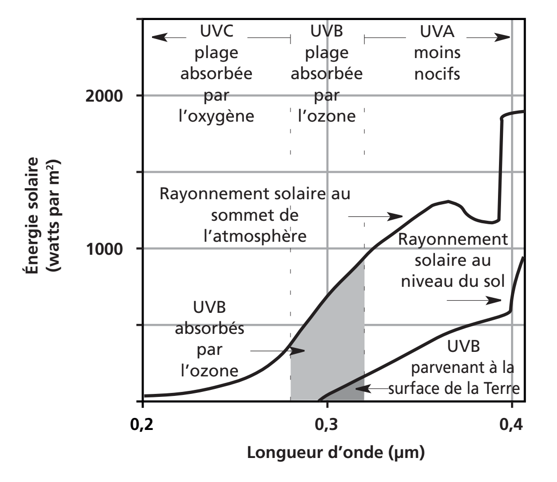
Mis à part la peau, la partie du corps humain la plus exposée à la lumière est l'œil. Les UVB peuvent brûler la cornée, provoquant un état douloureux appelé « cécité des neiges », car elle touche les skieurs et les alpinistes à des altitudes élevées. Lorsqu'elle

---

4. B. K. Armstrong et A. Kricker, « Epidemiology of Sun Exposure and Skin Cancer », *Cancer Surveys*, vol. 26, 1996.

5. Voir, par exemple, Robin Russell Jones, « Ozone Depletion and Cancer Risk », *Lancet*, 22 août 1987 ; « Skin Cancer in Australia », *Medical Journal of Australia*, 1er mai 1989 ; Alan Atwood, « The Great Cover-up », *Time* (Australie), 27 février 1989 ; Medwin M. Mintzis, « Skin Cancer : The Price for a Depleted Ozone Layer », *EPA Journal*, décembre 1986.

FIGURE 5-2 – L'absorption de la lumière par l'atmosphère



Les rayonnements ultraviolets que nous envoie le soleil sont presque entièrement absorbés par l'oxygène et l'ozone dans l'atmosphère. L'ozone absorbe tout particulièrement les rayonnements de la plage appelée UVB, dangereuse pour les êtres vivants. **(Source : PNUE)**

est occasionnelle, cette cécité se contente d'être très douloureuse, mais lorsqu'elle survient à plusieurs reprises, elle peut réduire la vision de façon permanente. Les UVB peuvent aussi endommager la rétine et provoquer des cataractes sur le cristallin.

Si davantage d'UVB atteignaient la surface de la Terre, n'importe quel animal dont les yeux et la peau sont exposés au rayonnement solaire pourrait souffrir des mêmes effets que les êtres humains. Les études détaillées sur les autres conséquences des UVB n'en sont qu'à leurs débuts, mais certains résultats ne font déjà plus de doute :

- Les organismes unicellulaires et de très petite taille sont davantage vulnérables que les grands organismes, car les UVB ne peuvent pénétrer qu'un petit nombre de couches de cellules.

- Les UVB ne parviennent à traverser que les premiers mètres de la surface des océans, mais ce sont ceux qui abritent la plupart des micro-organismes aquatiques. Or les recherches montrent que ces plantes et ces animaux qui flottent sont sensibles aux UVB[6]. Les chercheurs ne sont toujours pas d'accord sur l'ampleur de l'effet des UVB ni sur leur impact sur les interactions entre les différentes espèces d'un écosystème, mais ces micro-organismes étant à la base de la plupart des chaînes alimentaires des océans, une augmentation des UVB perturberait de nombreuses espèces océaniques.
- L'exposition aux UVB réduit la taille des feuilles, la hauteur des plantes et la photosynthèse des végétaux verts. Les cultures agricoles réagissent toutes différemment aux UVB, mais dans 60 % des cas étudiés, le rendement baisse à mesure que les UVB augmentent. Une étude a ainsi montré qu'une diminution de 25 % de la couche d'ozone pourrait réduire les rendements de soja de 20 %[7].
- Il semblerait que les rayonnements ultraviolets détériorent les polymères et les plastiques extérieurs, ce qui contribue à la formation d'ozone troposphérique, un élément du smog urbain.

Les êtres vivants ont suivi différentes évolutions pour se protéger des rayons ultraviolets : pigmentation, pelage, écailles, mécanismes de restauration de l'ADN endommagé et schémas comportementaux qui poussent les organismes sensibles à se protéger du soleil. Mais étant donné que ces mécanismes fonctionnent mieux chez certaines espèces que chez d'autres, l'une des conséquences d'une couche d'ozone amoindrie pourrait être

6. Osmund Holm-Hansen, E. W. Heibling et Dan Lubin, « Ultraviolet Radiation in Antarctica : Inhibition of Primary Production », *Photochemistry and Photobiology*, vol. 58, n° 4, 1993.

7. A. H. Teramura et J. H. Sullivan, « How Increased Solar Ultraviolet-B Radiation May Impact Agricultural Productivity » *in Coping with Climate Change*, Washington, DC, Climate Institute, 1989.

le déclin ou l'extinction de certaines espèces et la prolifération d'autres. Les herbivores pourraient ainsi devenir trop nombreux par rapport aux quantités de fourrage disponible, les nuisibles pourraient l'emporter sur leurs prédateurs et les parasites, sur leurs hôtes. Tous les écosystèmes subiraient les effets d'une diminution de la couche d'ozone, mais d'une manière impossible à prévoir, surtout si d'autres changements comme le réchauffement climatique intervenaient au même moment.

Les premiers signaux

En 1974, deux articles scientifiques publiés indépendamment l'un de l'autre évoquent une menace envers la couche d'ozone. Le premier explique que les atomes de chlore dans la stratosphère pourraient être de puissants destructeurs de la couche d'ozone[8] et le second affirme que les CFC atteignent la stratosphère et s'y décomposent en libérant des atomes de chlore[9]. Les deux articles estiment que l'utilisation des CFC par les humains pourrait avoir des conséquences extrêmement graves.

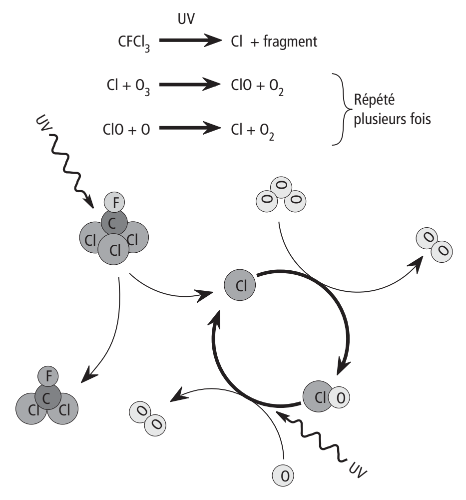
Du fait qu'ils sont inertes et insolubles, les CFC ne se dissolvent pas sous la pluie et ne réagissent pas avec d'autres gaz. La longueur d'onde des rayonnements solaires qui atteignent la basse atmosphère ne casse pas leurs fortes liaisons carbone-chlore et carbone-fluor. Le seul moyen ou presque pour qu'une molécule de CFC soit évacuée de l'atmosphère est qu'elle s'élève suffisamment haut pour rencontrer des ultraviolets de courte longueur d'onde, ceux-là mêmes qui n'atteignent jamais la surface du globe puisque l'ozone et l'oxygène les filtrent. Ce rayonnement casse la molécule de CFC, libérant des atomes de chlore.

---

8. Richard S. Stolarski et Ralph J. Cicerone, « Stratospheric Chlorine : A Possible Sink for Ozone », *Canadian Journal of Chemistry*, vol. 52, nº 8, 1974.

9. Mario J. Molina et F. Sherwood Rowland, « Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes : Chlorine Atomic Catalysed Destruction of Ozone », *Nature*, vol. 249, nº 5460, 28 juin 1974 ; Monlina et Rowland ont reçu le prix Nobel de chimie pour leurs recherches en 1995.

FIGURE 5-3 – La destruction de l'ozone stratosphérique par les CFC



Les molécules de CFC qui s'élèvent haut dans la stratosphère sont brisées par la lumière ultraviolette et libèrent des atomes de chlore (Cl). Ces atomes réagissent avec l'ozone (O_3) pour produire du monoxyde de chlore (ClO). Celui-ci réagit alors avec un atome d'oxygène et libère à nouveau du Cl, qui peut à son tour réagir avec une autre molécule d'ozone, et ainsi de suite. Ce cycle se répète de nombreuses fois, ce qui réduit considérablement la concentration d'ozone dans l'atmosphère.

C'est ici que les ennuis commencent. Les atomes de chlore (Cl) réagissent en effet avec l'ozone pour donner de l'oxygène et de l'oxyde de chlore (ClO). Puis, le ClO réagit avec l'oxygène (O) pour donner du dioxygène (O_2) et *à nouveau* du Cl. L'atome de chlore peut ensuite transformer une nouvelle molécule d'ozone en oxygène et en oxyde de chlore, et ainsi de suite (figure 5-3).

Un atome de Cl peut reproduire cette réaction de nombreuses fois, détruisant à chaque fois une molécule d'ozone. Il en détruit en moyenne 100 000 avant de disparaître (suite à une réaction avec du méthane ou du dioxyde d'azote qui l'immobilisent et provoquent sa redescente sur terre).

Les temps de réaction

Pour qu'il y ait dépassement, il doit y avoir temps de réaction, or ceux-ci sont nombreux concernant l'ozone. La régénération continue du Cl signifie que de nombreuses années s'écoulent entre son arrivée dans la stratosphère et le moment où il cesse de casser les molécules d'ozone. Il faut aussi prendre en compte le long laps de temps entre la synthèse industrielle d'une molécule de CFC et sa pénétration dans la haute stratosphère. Pour certains usages (en tant que propulseurs d'aérosols par exemple), leur production est rapidement suivie de leur rejet dans l'air ; pour d'autres (en tant que réfrigérants ou isolants dans les mousses), ils ne pénètrent dans l'air que plusieurs années après leur production. Et après leur rejet dans l'air, il faut des dizaines d'années pour que toutes les molécules de CFC soient transportées par les courants atmosphériques jusqu'à la haute stratosphère. C'est pourquoi chaque mesure de la diminution de la couche d'ozone est la conséquence d'une fabrication de CFC antérieure de plusieurs années, voire de plusieurs décennies.

Le processus selon lequel des connaissances nouvelles conduisent, au bout du compte, à un consensus scientifique subit, lui aussi, des retards, bien que dans le cas présent, plusieurs facteurs d'ordre politique aient réduit le temps perdu.

Les deux articles qui avaient annoncé une diminution de la couche d'ozone ont provoqué la multiplication des recherches sur la chimie du chlore dans l'atmosphère. Aux États-Unis, l'information scientifique est rapidement parvenue jusqu'à la sphère politique ; ceci est en partie dû au fait que les auteurs d'un des tout premiers articles étaient américains, que leurs découvertes avaient éveillé en eux une profonde inquiétude et qu'ils ont eu à cœur de porter leurs conclusions à la connaissance du grand public (surtout F. Sherwood Rowland, qui a porté l'affaire devant la National Academy of Sciences et le Congrès américain). Le fait que les mouvements de défense de l'environnement aient été bien

organisés a également contribué à accroître la prise de conscience du problème dans ce pays.

Lorsque les écologistes américains comprennent les implications entre les CFC et la couche d'ozone, ils passent à l'action. Ils commencent par condamner l'utilisation des CFC dans les bombes aérosol. C'est complètement insensé, affirment-ils, de menacer la vie sur Terre simplement pour pouvoir continuer à s'asperger de déodorant ou de mousse à raser. Cette stigmatisation prend d'ailleurs une tournure assez caricaturale puisqu'il existe à l'époque des bombes aérosol sans CFC et que ces derniers sont présents dans bien d'autres applications. Mais les bombes aérosol sont présentées comme des tueuses d'ozone et les consommateurs suivent : les ventes chutent de plus de 60 %. On le voit bien sur la figure 5-1 : les ventes cessent provisoirement d'augmenter vers 1975. Les pressions politiques en faveur d'une loi interdisant l'utilisation des CFC dans les bombes aérosol se font alors plus insistantes.

On grince évidemment des dents du côté des industriels. Un cadre de DuPont vient témoigner devant le Congrès américain en 1974, affirmant que « l'hypothèse d'un lien entre le chlore et l'ozone est à ce stade purement spéculative et qu'aucune preuve irréfutable ne la sous-tend ». Il ajoute cependant que « si des données scientifiques dignes de confiance… montrent que les CFC représentent un danger pour la santé, DuPont arrêtera la production de ces composés »[10]. Mais il faudra attendre 14 ans pour que le plus gros producteur de CFC au monde respecte cet engagement.

Une loi interdisant l'utilisation des CFC dans les bombes aérosol est finalement votée aux États-Unis en 1978. Elle vient s'ajouter à l'action des consommateurs qui ont déjà réduit leur consommation de bombes aérosol, si bien qu'elle provoque une forte baisse de la fabrication mondiale de CFC. Dans la majorité

10. Cité dans Richard E. Benedick, *Ozone Diplomacy*, Cambridge, MA, Harvard University Press, 1991.

des autres pays de la planète, cependant, les bombes aérosol contiennent toujours des CFC et l'utilisation de ces derniers, dans l'industrie électronique en particulier, continue à augmenter. En 1980, l'utilisation des CFC dans le monde retrouve son niveau record de 1975 et poursuit sa hausse (figure 5-1).

Le dépassement : le trou dans la couche d'ozone

En octobre 1984, des chercheurs du British Antarctic Survey mesurent une baisse de 40 % de l'ozone stratosphérique sur leur site de Halley Bay en Antarctique. Les mesures qu'ils effectuent chaque année en octobre indiquent une baisse régulière depuis environ 10 ans (figure 5-4), mais ils ont du mal à croire à ces résultats. Une diminution de 40 % paraît impossible. Les simulations informatiques s'appuyant sur les connaissances qu'on a à l'époque de la chimie de l'atmosphère prévoient tout au plus une baisse de quelques pourcents.

Les chercheurs vérifient leurs instruments. Ils cherchent des mesures effectuées ailleurs qui pourraient corroborer les leurs. Ils finissent par en trouver une : une station de mesure située à environ 1600 km en direction du nord-ouest indique, elle aussi, une baisse considérable de l'ozone stratosphérique.

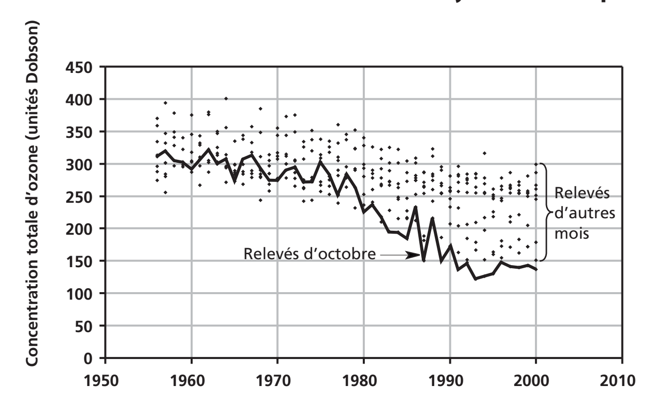
C'est en mai 1985 qu'est publié un article historique annonçant un « trou dans la couche d'ozone » dans l'hémisphère Sud[11]. Les scientifiques du monde entier sont sous le choc. Si c'est vrai, cela signifie que l'humanité a déjà dépassé une limite planétaire. L'utilisation des CFC a dépassé les limites soutenables et les humains sont en train de détruire ce bouclier censé les protéger.

Les chercheurs de l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA), aux États-Unis, se précipitent alors pour vérifier les mesures de l'ozone atmosphérique régulièrement effectuées par le satellite Nimbus 7 depuis 1978. Celui-ci n'a jamais indiqué le moindre trou dans la couche d'ozone. En

---

11. J. C. Farman, B. G. Gardiner et J. D. Shanklin, « Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO/NO_2 Interaction », *Nature*, vol. 315, nº 6016, 16 mai 1985.

FIGURE 5-4 – Mesures de l'ozone à Halley en Antarctique



La concentration d'ozone dans l'atmosphère au-dessus de Halley, en Antarctique, telle que mesurée au mois d'octobre lorsque le soleil refait son apparition au printemps, baissait déjà depuis plus de 10 ans lorsque les articles annonçant le trou dans la couche d'ozone ont été publiés en 1985. Les relevés effectués au mois d'octobre ont continué par la suite à afficher une diminution de l'ozone. **(Source : J. D. Shanklin)**

vérifiant à nouveau, les scientifiques de la NASA s'aperçoivent que leurs ordinateurs ont été *programmés pour rejeter les relevés d'ozone très bas* en s'appuyant sur le fait que de tels relevés doivent traduire une erreur commise par les instruments[12].

Fort heureusement, les mesures rejetées par l'ordinateur sont récupérables. Elles confirment les observations faites à Halley Bay, apportant la preuve que les niveaux d'ozone baissent au-dessus du pôle Sud depuis dix ans déjà. Les chercheurs obtiennent en outre une carte détaillée du trou dans la couche d'ozone. Il est gigantesque. Il fait à peu près la superficie des États-Unis et il a gagné chaque année en surface et en profondeur.

12. La période durant laquelle les chercheurs ont eu sous les yeux des relevés d'ozone peu élevés mais ne les ont pas « vus » est bien décrite par Paul Brodeur dans *Annals of Chemistry*, 71.

Pourquoi un trou ? Pourquoi au-dessus de l'Antarctique ? Que laissent présager ces résultats concernant la protection de la planète tout entière vis-à-vis des UVB ? Dans les années qui suivent, le travail accompli par les chercheurs pour résoudre ce mystère est tout simplement phénoménal. L'une des preuves les plus flagrantes que le chlore est bien le coupable est apportée en septembre 1987 lorsque les scientifiques font décoller un avion d'Amérique du Sud en direction du pôle Nord via le trou dans la couche d'ozone. La figure 5-5 montre les mesures qu'ils ont prises de l'ozone et du ClO pendant le vol. Aux hausses et aux baisses d'ozone correspondent quasi exactement les baisses et les hausses de ClO[13]. En outre, les mesures de la concentration de ClO dans le « trou » sont plusieurs centaines de fois plus élevées que ce que donne la composition chimique normale de l'atmosphère. On parle souvent de ce graphique comme de l'« indice flagrant » qui a prouvé, y compris aux fabricants de CFC, que le trou dans la couche d'ozone n'était pas un phénomène normal. Il traduit une forte perturbation de l'atmosphère due à des polluants produits par l'homme et contenant du chlore.

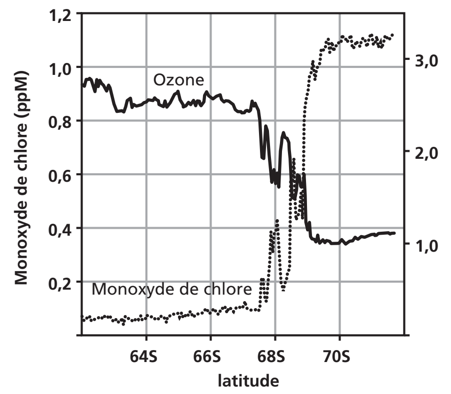
Il aura donc fallu plusieurs années aux chercheurs pour trouver une explication au trou dans la couche d'ozone. La voici en un mot.

Étant donné que l'Antarctique est entouré d'océans, les vents peuvent circuler tout autour sans rencontrer d'étendue de terre. Durant l'hiver austral, ils forment un *vortex circumpolaire*, c'est-à-dire un tourbillon qui emprisonne l'air au-dessus du continent et l'empêche de se mélanger au reste de l'atmosphère. Ce vortex crée une « cuve de réaction » de substances atmosphériques polaires. (Il n'y a pas de vortex aussi fort autour du pôle Nord, c'est pourquoi le trou d'ozone y est moins prononcé.)

---

13. J. G. Anderson, W. H. Brune et M. J. Proffitt, « Ozone Destruction by Chlorine Radicals within the Antarctic Vortex : The Spatial and Temporal Evolution of ClO-O_3 Anticorrelation Based on In Situ ER-2 Data », *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, 30 août 1989.

FIGURE 5-5 – Plus le chlore réactif augmente, plus l'ozone de l'Antarctique diminue



Les instruments embarqués à bord de l'avion de recherche ER-2 de la NASA ont simultanément mesuré les concentrations de monoxyde de chlore et d'ozone durant le vol entre Punta Arenas, au Chili (53°S), et le point situé à 72° de latitude sud. Les données présentées ci-dessus ont été recueillies le 16 septembre 1987. Lorsque l'avion a pénétré dans le trou de la couche d'ozone, la concentration de monoxyde de chlore a augmenté très largement au-dessus de la normale et le niveau d'ozone a chuté. Ces résultats ont contribué à entériner le fait que les polluants contenant du chlore étaient responsables du trou dans la couche d'ozone. **(Source : J. G. Anderson et al.)**

En hiver, la stratosphère antarctique est l'endroit le plus froid de la Terre (il y fait jusqu'à – 90 °C). Dans cet environnement glacial, la vapeur d'eau stagne sous forme d'un brouillard constitué de minuscules cristaux de glace. Cette glace agit comme catalyseur : la surface de ces innombrables cristaux favorise la réaction chimique qui brise les CFC et libère le chlore destructeur de l'ozone.

Les atomes de chlore qui se forment pendant la nuit de l'hiver antarctique ne participent pas immédiatement à la réaction en chaîne qui va détruire l'ozone. Chacun d'eux réagit une seule fois avec l'ozone et forme du ClO. Les molécules de ClO s'associent

deux par deux pour former le dimère ClOOCl relativement stable. Ces dimères s'accumulent alors, prêts pour le retour du soleil[14].

Chaque année, en septembre et en octobre, lors du printemps antarctique, le rayonnement solaire casse les molécules de ClOOCl qui libèrent une quantité considérable de Cl ; celui-ci s'attaque à l'ozone dont la concentration chute.

Petit à petit, la lumière solaire dissipe le vortex circumpolaire, ce qui permet à l'air du pôle Sud de se mélanger à nouveau. L'air pauvre en ozone est dispersé sur l'ensemble du globe, tandis que les niveaux d'ozone sur l'Antarctique recouvrent des valeurs quasi normales.

On a observé moins de trous au-dessus du pôle Nord au printemps et il ne devrait pas y en avoir ailleurs, mais à mesure que les gaz se mélangent dans l'atmosphère, la concentration d'ozone stratosphérique tout autour du globe diminue. Du fait de la longue durée de vie des CFC et du Cl dans l'atmosphère, la diminution de la couche d'ozone durera longtemps : au moins un siècle. Ainsi, en dépassant les limites (définies par le taux durable maximal d'émissions de CFC), l'humanité s'est condamnée à une longue période de moindre protection des UVB par l'ozone, et ce même si les émissions étaient arrêtées dès aujourd'hui. Le dépassement est donc une réalité et le restera encore longtemps.

L'étape suivante : le temps de la négociation

Toutes les personnes impliquées à l'époque dans les négociations internationales ne sont pas d'accord : toutes n'estiment pas que l'annonce d'un trou dans la couche d'ozone en 1985 ait aiguillonné les hommes politiques avec autant d'efficacité que les chercheurs. Des discussions étaient déjà en cours pour limiter la production de CFC, mais elles n'avaient pas beaucoup avancé. Une réunion tenue à Vienne deux mois avant la fameuse annonce s'était achevée sur

14. Mario J. Molina, « The Antarctic Ozone Hole », *Oceanus*, vol. 31, n° 2, été 1988.

une déclaration positive selon laquelle les pays devaient prendre les « mesures appropriées » pour protéger la couche d'ozone, mais aucun calendrier n'avait été fixé et aucune sanction, stipulée. Les industriels avaient abandonné toute recherche sur des substituts aux CFC puisqu'ils ne semblaient pas nécessaires dans un avenir proche[15]. Le lien entre le trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique et les CFC ne sera établi avec certitude que trois ans plus tard.

Il s'est pourtant bel et bien produit quelque chose sur le plan politique entre mars 1985 à Vienne, où aucune véritable action n'a été décidée, et septembre 1987 à Montréal, où le premier protocole international sur la couche d'ozone a été signé par les représentants de 47 pays. Le trou découvert au-dessus de l'Antarctique a sans aucun doute eu un effet psychologique et ce d'autant plus, peut-être, qu'on ne savait pas l'expliquer. Il ne faisait aucun doute que la couche d'ozone se comportait de façon étrange. Et bien qu'il n'ait encore existé aucune preuve à l'époque, les connaissances étaient suffisantes pour faire des CFC les coupables probables.

Preuve ou pas preuve, rien n'aurait été possible sans le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), qui a hébergé le processus politique international et pour lequel il a œuvré. Ses équipes ont rassemblé et interprété les preuves scientifiques, les ont présentées aux États, ont fourni un terrain neutre aux discussions de haut vol et se sont positionnées en médiateurs. Le directeur de l'époque, Mustafa Tolba, s'est avéré un diplomate environnemental de premier plan, restant neutre lors des nombreuses querelles qui sont survenues et répétant inlassablement à tout un chacun que les considérations égocentriques et à courte vue devaient céder le pas à la lutte pour la couche d'ozone qui protégeait la Terre.

---

15. DuPont arrêta ses recherches sur des substituts aux CFC au moment de l'élection de Ronald Reagan à la présidence des États-Unis en 1980.

Le processus des négociations a été tout sauf simple[16]. Les États du monde entier étaient confrontés à un problème environnemental mondial que les scientifiques ne comprenaient que partiellement et qui n'avait pas encore causé de dégâts tangibles sur la santé humaine ni sur l'économie. Les pays qui étaient de gros producteurs de CFC ont joué le rôle qu'on attendait d'eux en essayant d'empêcher toute réduction de l'utilisation de ces substances. Certaines décisions critiques n'ont parfois tenu qu'à un mince fil politique. Les États-Unis ont ainsi joué un important rôle de leader, rôle qui a plusieurs fois été ébranlé par les profondes dissensions au sein de l'administration Reagan. Ces dissensions sont apparues sur le devant de la scène lorsque Donald Hodel, secrétaire d'État à l'Intérieur, a déclaré en public que le trou dans la couche d'ozone n'était pas un problème pour peu que les individus sortent toujours coiffés d'un chapeau à larges bords et équipés de lunettes de soleil. Le ridicule dont s'est couvert le secrétaire d'État dans le monde entier à l'occasion de cette déclaration (on a même vu des dessins satiriques représentant des vaches, des chiens, des arbres et des épis de maïs arborant un chapeau et des lunettes de soleil !) a en fait servi les membres de l'administration américaine qui essayaient de persuader le président de prendre le problème de l'ozone au sérieux.

Le PNUE, pendant ce temps, continuait de jouer son rôle. Tandis que les groupes de défense de l'environnement, en Europe et aux États-Unis, faisaient pression sur leur gouvernement, les scientifiques organisaient des ateliers pour former les journalistes, les parlementaires et le grand public à la question. Pressés de tous côtés, les États se sont décidés, avec une étonnante rapidité, à signer le Protocole relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone à Montréal, en 1987.

---

16. Le processus politique est décrit de façon claire et exhaustive par Richard Benedick, qui était le négociateur en chef des États-Unis dans R. E. Benedick, *Ozone Diplomacy : New Directions in Safeguarding the Planet*, 2[e] édition, Cambridge, MA, et Londres, Harvard University Press, 1998.

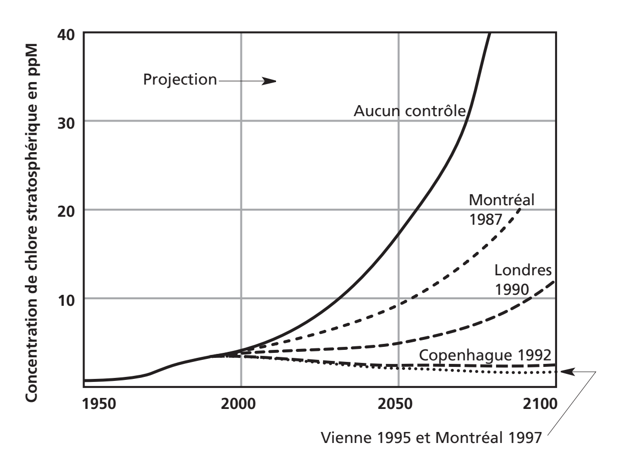
Le Protocole de Montréal stipulait que la production mondiale des cinq types de CFC les plus utilisés devait être gelée à son niveau de 1986. La production devait ensuite avoir diminué de 20 % pour 1993, puis de 30 % pour 1998. Cet accord sur un « gel 20-30 » a été signé par tous les grands producteurs de CFC.

Le Protocole de Montréal a constitué une avancée historique, allant beaucoup plus loin que ce que les écologistes de l'époque estimaient politiquement possible. Mais les réductions qu'il prévoyait se sont vite avérées insuffisantes. La figure 5-6 montre la façon dont aurait évolué la concentration en Cl dans la stratosphère si les émissions avaient été réduites conformément au Protocole de Montréal (et à tous les accords qui ont suivi à Londres, Copenhague, Vienne et de nouveau à Montréal ; nous y reviendrons plus loin). En effet, malgré les coupes claires dans la production, les importants stocks de CFC déjà produits mais pas encore rejetés dans l'atmosphère et ceux qui avaient été rejetés mais n'avaient pas encore atteint la stratosphère auraient continué à accroître la concentration en Cl.

Les raisons de la timidité de ce protocole sont compréhensibles. La plupart des pays en cours d'industrialisation ne l'ont pas signé. La Chine, par exemple, était à l'époque en train d'équiper des millions de foyers de leur premier réfrigérateur, ce qui signifie que la demande de fréon était considérable. L'URSS tergiversait, affirmant que son plan quinquennal ne lui permettait pas de modifier rapidement la production de CFC. Elle a donc demandé et obtenu un calendrier de réduction plus lent. Et la plupart des fabricants de CFC espéraient bien sauver au moins une partie de leur marché.

Dans l'année qui a suivi la signature du protocole, cependant, des mesures ont révélé une aggravation de la diminution de la couche d'ozone et l'« indice flagrant » a été publié. DuPont a alors annoncé qu'il allait totalement arrêter sa production de CFC et en 1989, les États-Unis et l'Europe ont déclaré qu'ils cesseraient de produire les cinq types de CFC les plus répandus pour l'année 2000. Ils ont également demandé au reste du monde de prendre

FIGURE 5-6 – Projection de l'augmentation de la concentration de chlore et de bromure stratosphériques inorganiques due aux émissions de CFC



Concentrations stratosphériques passées et à venir de chlore et de bromure selon le type de politique adoptée : en l'absence de tout protocole, selon les dispositions du Protocole de Montréal en 1987 et selon les accords qui ont suivi. Si la production de CFC s'était poursuivie à son niveau de 1986, on serait arrivé en 2050 à une concentration de chlore dans la stratosphère multipliée par 8. Le Protocole de Montréal de 1987 stipulait des taux d'émission moins élevés, mais il aurait néanmoins permis une augmentation exponentielle des niveaux de chlore. L'amendement de Londres a supprimé l'utilisation de la plupart des CFC, mais pas de tous, et aurait lui aussi abouti à une augmentation des niveaux de chlore à partir de l'an 2050 environ. Les accords suivants ont petit à petit renforcé les restrictions sur l'utilisation de substances chimiques rejetant du chlore, ce qui donne des projections de niveaux de chlore en baisse dans la stratosphère après 2000. **(Sources : WMO ; EPA ; R. E. Bendick)**

en compte ce qui avait été stipulé dans le Protocole de Montréal, à savoir la réévaluation périodique de la situation et la prise de mesures plus strictes si nécessaire.

Au terme d'une nouvelle série de négociations, à nouveau sous l'égide du PNUE, les gouvernements de 92 pays se sont réunis à

Londres en 1990 et ont accepté d'abandonner progressivement la production de CFC pour l'année 2000. Ils ont ajouté à la liste le méthylchloroforme, le tétrachlorure de carbone et les halons, qui s'attaquent tous à la couche d'ozone. Plusieurs pays en voie d'industrialisation ont refusé de signer tant qu'un fonds international n'était pas créé pour les aider à assurer la transition technique vers les substituts aux CFC. On a frôlé l'échec lorsque les États-Unis ont rechigné à apporter leur contribution à ce fonds, mais l'accord a finalement été signé. La figure 5-6 montre l'évolution prévisible du chlore stratosphérique (et du bromure, autre produit destructeur de la couche d'ozone) selon l'amendement de Londres.

Au printemps 1991, de nouvelles mesures par satellite effectuées au-dessus de l'hémisphère Nord ont montré que la diminution de l'ozone survenait deux fois plus vite que prévu. Au-dessus de certaines zones peuplées en Amérique du Nord, en Europe et en Asie centrale, la baisse des niveaux d'ozone se prolongeait pour la première fois jusqu'à l'été, un moment de l'année où les rayonnements peuvent être nocifs pour l'homme comme pour les cultures. Par la suite, au cours des années 1990, des niveaux d'ozone inférieurs à la moyenne ont même été enregistrés jusqu'en Espagne.

Conséquence de ces inquiétants résultats, toute une série de pays, l'Allemagne en tête, ont décidé d'arrêter la production de CFC et d'halons encore plus vite que ce qui était prévu dans l'amendement de Londres. Ils ont été suivis par de nombreuses multinationales, surtout dans l'industrie électronique et automobile. Certains pays en développement, comme le Mexique, ont annoncé qu'ils ne comptaient pas profiter du délai de grâce de 10 ans qui leur avait été accordé et suivraient le même calendrier de réduction que les pays industrialisés. Petit à petit, tous les pays, y compris la Chine et l'Inde, les ont imités.

Lors de la session de négociations suivante, à Copenhague, en 1992, les pays signataires du Protocole de Montréal se sont mis d'accord pour accélérer à nouveau le calendrier : ils ont décidé d'éliminer toute nouvelle production de halons pour 1994 et tous

les CFC pour 1996, et de fixer un plafond aux émissions de bromure de méthyle, « fumigant » du sol et puissant destructeur d'ozone dont il n'avait pas été question à Londres. Le « renforcement » de Copenhague devait, d'après les modèles atmosphériques de l'époque, ramener la couche d'ozone à son niveau de 1980 dix années plus tôt que les mesures prises à Londres (soit en 2045 et non en 2055). Il devait réduire la perte cumulée d'ozone de 28 %, permettant d'éviter 4,5 millions de cas de cancer de la peau et 350 000 cas de cécité[17]. Il est par la suite devenu évident que ce « renforcement » était en fait indispensable pour obtenir quelque diminution que ce soit de la concentration de chlore et de brome (voir figure 5-6).

En 1996, 157 pays ont signé l'accord renforcé. Il devenait dès lors difficile de faire beaucoup plus. De petits ajustements ont été apportés au Protocole de Montréal en 1997, à l'occasion de son 10e anniversaire. L'évaluation scientifique de l'élimination de l'ozone de 1998 (conduite sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et du PNUE)[18] notait, cette année-là, que « d'après les émissions passées de substances qui appauvrissent la couche d'ozone et les projections réalisées à partir des quantités maximales autorisées à l'avenir par le Protocole de Montréal, l'appauvrissement maximum de l'ozone devrait intervenir au cours de la décennie actuelle ou lors des deux prochaines ». Quatre ans plus tard, dans l'évaluation de 2002, on pouvait lire : « Les niveaux d'ozone au-dessus de l'Antarctique vont augmenter à partir de 2010. On attend un retour aux niveaux d'avant 1980 d'ici le milieu du siècle[19]. » Il était néanmoins trop tard pour avoir une quelconque influence sur la période lors de laquelle la dimi-

---

17. *Ibid.*

18. PNUE, « Synthesis of the reports of the Scientific Assessment and Technology and Economic Assessment Panels on the Impact of HCFC and Methyl Bromide Emissions », Nairobi, mars 1995, section 4.

19. Organisation météorologique mondiale, « Scientific Assessment of Ozone Depletion : 2002 », rapport 47 du Projet mondial de surveillance et de recherche concernant l'ozone, disponible sur <www.unep.org/ozone>.

nution d'ozone connaîtrait un pic, entre 1995 et 2010, car les substances chimiques responsables étaient déjà en train de s'élever lentement dans la stratosphère. Mais pour s'assurer que le pic en serait bien un et que la couche d'ozone allait ensuite commencer à se rétablir, la tâche première consistait à respecter le protocole et à le faire appliquer. La Conférence des Parties au Protocole de Montréal a donc continué à se réunir et à améliorer l'accord : en 1999, à Pékin, les participants ont ainsi accepté d'augmenter le fonds multilatéral qui aide les pays en développement à financer les efforts qu'ils doivent faire pour respecter leurs échéances. D'autres substances sont actuellement ajoutées au régime et le commerce des substances appauvrissant la couche d'ozone est en train d'être interdit.

En 2000, la production mondiale de « gaz à CFC » avait chuté par rapport à son année record de 1988 : elle était en effet passée de plus d'un million de tonnes à moins de 100 000 par an (figure 5-1)[20]. L'adaptation de l'industrie à cette baisse progressive de la production de produits chimiques importants a finalement été infiniment moins coûteuse et perturbatrice que ce que l'on aurait pu croire lorsque les négociations internationales ont commencé. (La facture totale, en définitive, en comptant le coût des négociations et celui de l'application du protocole, est estimée à 40 milliards de dollars[21].) Étant donné que les CFC sont aussi des gaz à effet de serre et qu'ils sont des milliers de fois plus puissants que le dioxyde de carbone, leur suppression progressive va également contribuer à freiner la progression du changement climatique sur

---

20. À l'époque, le bureau du PNUE qui recueille ces informations avait arrêté de produire des données chronologiques agrégées à cause des variations d'une année sur l'autre dans la qualité des rapports. Voir « Production and Consumption of Ozone Depleting Substances under the Montreal Protocol 1986-2000 », Nairobi, PNUE, 2002, disponible sur <www.unep.ch/ozone/> ou <http://ozone.unep.org/pdfs/15-year-data-report.pdf>. Les statistiques relatives à la production figurent dans les tableaux 1 et 2, page 18 et suivantes.

21. F. A. Vogelsberg, « An Industry Perspective : Lessons Learned and the Cost of the CFC Phaseout », article présenté lors de l'International Conference on Ozone Protection Technologies, Washington, DC, octobre 1996.

Terre. Les HCFC, des substituts moins nocifs, sont produits à l'heure actuelle au rythme d'un demi-million de tonnes par an (figure 5-1).

Pendant tout ce temps, des nouvelles ont continué à arriver de façon morcelée de la stratosphère. En 1995 et 1996, la concentration d'ozone au-dessus du pôle Nord a à nouveau atteint des niveaux historiquement bas, accusant même une brève chute de 45 % au-dessus de la Sibérie. La diminution de la couche d'ozone aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord durant l'hiver et l'été 1998 a été en moyenne de 6 à 7 %. À l'automne 1998, le trou d'ozone au-dessus du pôle Sud n'avait jamais été aussi profond ni aussi étendu[22]. La même observation sera à nouveau faite en 2000 puis en 2003. Et bien que cet agrandissement du trou d'ozone se soit progressivement ralenti, l'OMM et son évaluation scientifique de 2002 ne pouvaient pas encore « dire si la surface du trou d'ozone (au-dessus de l'Antarctique) avait atteint son maximum », mais elles affirmaient que « la couche d'ozone allait lentement se reconstituer au cours des 50 prochaines années »[23].

La couche d'ozone va connaître sa fragilité maximale durant les 20 premières années du XXI[e] siècle. Si le Protocole de Montréal et les amendements suivants sont respectés, si la fabrication illégale de CFC cesse et si d'importantes éruptions volcaniques (qui peuvent elles aussi porter atteinte à l'ozone stratosphérique pendant de courtes périodes) ne surviennent pas, la couche d'ozone devrait recouvrer peu ou prou son état antérieur aux alentours de 2050.

L'un des problèmes, dans cette belle histoire, reste l'augmentation de la contrebande de CFC. Bien que les États-Unis et l'Europe aient interdit à la fois la fabrication et l'importation de CFC, beaucoup étaient prêts à payer le prix fort pour recharger la climatisation de leur voiture ou leurs dispositifs de refroidissement. Aux

---

22. Richard A. Kerr, « Deep Chill Triggers Record Ozone Hole », *Science*, vol. 282, n° 5388, 16 octobre 1998.

23. OMM, « Scientific Assessment », XIV et XV.

États-Unis, une taxe très élevée sur les nouveaux CFC, destinée à encourager le recyclage, a fait grimper les prix encore davantage. Et les pays autorisés par le protocole à continuer à fabriquer des CFC jusqu'en 2010 (essentiellement la Russie, la Chine et l'Inde) ont eu du mal à résister à un marché si lucratif. Les contrebandiers ont recours à des subterfuges consistant par exemple à présenter les CFC qu'ils fabriquent comme étant recyclés. D'après le Département américain de la Justice, les profits réalisés grâce aux CFC importés illégalement sont plus élevés que ceux liés à la cocaïne. Il est impossible d'obtenir des chiffres précis concernant ce marché – les estimations vont de 20 000 à 30 000 tonnes par an[24] – mais il n'est pas encore suffisamment développé pour empêcher la baisse de la production totale de CFC.

Cela dit, et malgré d'autres problèmes mineurs, la communauté internationale est dans l'ensemble parvenue à un consensus sur cette question et a énormément progressé dans la mise en œuvre de solutions. Il aura certes fallu plus de 25 ans, mais on a là la preuve que l'on peut réagir avec succès à un phénomène de dépassement.

Se passer des CFC

Tandis que la diplomatie était à l'œuvre, la créativité industrielle n'était pas en reste et trouvait des moyens de réduire les rejets de CFC et d'utiliser des substituts. La solution a consisté pour un tiers à réduire simplement le besoin de ces produits chimiques. Améliorer l'isolation permet ainsi d'avoir moins recours à des solutions réfrigérantes et recycler les produits chimiques pour pouvoir les réutiliser permet de réduire les émissions. Le deuxième tiers de la solution est venu de l'utilisation temporaire de substituts comme les CFC hydrogénés ou HCFC, qui ne possèdent que 2 à 10 % du pouvoir de destruction de la couche d'ozone des CFC.

24. World Resources Institute, *World Resources 1998-99*, *op. cit.* Voir également Tim Beardsley, « Hot Coolants », *Scientific American*, juillet 1998.

Ils doivent être progressivement éliminés d'ici 2030, ce qui laisse du temps pour trouver des solutions plus pérennes. Le troisième tiers de la solution, enfin, a consisté au recours à des alternatives qui n'attaquent aucunement la couche d'ozone.

Du fait de l'interdiction des CFC, intervenue aux États-Unis dès 1978, les fabricants avaient adopté d'autres types de propulseurs d'aérosols dont la plupart se sont avérés moins coûteux que les CFC. Ce qui a fait dire au chimiste de l'atmosphère Mario J. Molina : « En 1978, lorsque les États-Unis ont interdit l'utilisation des CFC comme fluide propulseur dans les bombes aérosol, les spécialistes ont affirmé que cette interdiction allait mettre un grand nombre de personnes au chômage. Il n'en a rien été[25]. »

Les agents de refroidissement des réfrigérateurs et des climatiseurs étaient auparavant relâchés dans l'air lors de l'entretien de ces appareils ou lorsque ceux-ci étaient jetés. Aujourd'hui, des dispositifs de recyclage permettent de les capturer, de les purifier et de les réutiliser. Aux États-Unis, le recyclage mais aussi la réparation des fuites sont encouragés par une taxe élevée qui rend le recyclage avantageux financièrement. Le problème qui se pose à l'heure actuelle est de bien dissocier les substituts sans danger de leurs prédécesseurs nuisibles à la couche d'ozone au cours du processus de recyclage.

Les entreprises d'électronique et d'aéronautique ont élaboré des solvants de substitution, dont de simples solutions à base d'eau, pour le nettoyage des circuits imprimés et de certaines parties des avions. Elles ont également repensé les processus de fabrication pour éliminer les phases de nettoyage, ce qui se traduit par des économies considérables. Des entreprises américaines et japonaises se sont en outre rapprochées pour faire profiter

25. Mario J. Molina, « Stratospheric Ozone : Current Concerns », article présenté lors du Symposium on Global Environmental Chemistry – Challenges and Initiatives, 198th National Meeting of the American Chemical Society, 10-15 septembre 1989, Miami Beach, Floride.

gratuitement les fabricants d'électronique du monde entier des fruits de leurs recherches en matière de solutions d'adaptation[26].

Les entreprises chimiques ont commencé à mettre sur le marché des CFC hydrogénés ainsi que d'autres composés pour des usages bien précis jusque-là réservés au CFC. La climatisation dans les voitures fonctionne aujourd'hui grâce à un de ces substituts baptisé HFC-134a. Et, contrairement à ce que l'on pensait, le coût supplémentaire de ce nouvel agent de refroidissement ne s'élève pas à 1 000 ou 1 500 dollars par voiture, mais à seulement 50 à 150 dollars.

On produit aujourd'hui les mousses plastique isolantes par injection d'autres gaz, les hamburgers sont emballés dans du papier ou du carton et non du plastique contenant des CFC, et les consommateurs soucieux de l'environnement utilisent de véritables tasses à café plutôt que des récipients jetables en plastique.

Les cultivateurs colombiens de fleurs coupées se sont aperçus qu'ils pouvaient pratiquer un contrôle intégré des organismes nuisibles au lieu de stériliser les sols avec du bromure de méthyle. Les agriculteurs kényans abandonnent ce dernier au profit du dioxyde de carbone pour fumiger les céréales stockées. Et les cultivateurs de tabac du Zimbabwe ont essayé la rotation des cultures à la place du bromure de méthyle. Enfin, selon une étude du PNUE, 90 % du bromure de méthyle utilisé pourraient être remplacés par d'autres méthodes de lutte phytosanitaire souvent moins coûteuses.

La morale de l'histoire

Dans un rapport rédigé par 350 chercheurs de 35 pays différents et coordonné par l'Organisation météorologique mondiale en 1999, l'avenir de la couche d'ozone semble faire l'unanimité :

26. Industrial Coalition for Ozone Layer Protection, 1440 New York Avenue NW, Suite 300, Washington, DC 20005, États-Unis.

> *L'appauvrissement de l'ozone dû aux composés chlorés et bromés fabriqués par l'homme devrait ralentir petit à petit puis s'arrêter d'ici le milieu du XXIe siècle environ, car ces composés sont lentement éliminés de l'atmosphère par des processus naturels. Nous devons cette victoire environnementale à un accord international sans précédent destiné à contrôler la production et l'utilisation des substances qui appauvrissent la couche d'ozone*[27].

On peut tirer bien des enseignements de l'histoire de la couche d'ozone selon la vision que l'on a du monde et selon ses orientations politiques. Voici ceux que nous avons retenus :

- Le suivi fréquent des paramètres importants de l'environnement est indispensable, tout comme la communication rapide et honnête des résultats.
- Les volontés politiques peuvent être unies à l'échelle internationale pour maintenir les activités humaines au sein des limites planétaires.
- Un accord international destiné à éviter les dégâts environnementaux à venir nécessite à la fois les bons outils pour réaliser des projections à long terme et la volonté de le faire.
- Ni les peuples ni les pays ne se doivent d'être irréprochables pour bâtir une coopération internationale efficace sur des problèmes complexes ; de même, une parfaite compréhension d'un phénomène ou des preuves scientifiques irréfutables ne sont pas indispensables pour passer à l'action.
- Un gouvernement planétaire n'est pas nécessaire pour traiter de problèmes eux aussi planétaires, mais il faut une coopération scientifique internationale, un système d'information international, un cadre international au sein duquel des accords peuvent être obtenus et une coopération internationale pour les faire respecter.

27. OMM, « Scientific Assessment », XXXIX.

- Scientifiques, technologues, responsables politiques, entreprises et consommateurs peuvent réagir vite lorsqu'ils en voient la nécessité, mais pas instantanément.
- Les sombres prédictions des industriels sur les conséquences économiques que peut avoir le respect d'une réglementation environnementale sont parfois exagérées. Elles peuvent être le résultat d'une désinformation délibérée dans le but de ralentir le changement politique, mais relèvent plus vraisemblablement de la sous-estimation systématique des potentialités en matière d'avancées technologiques et de changement social.
- Lorsque les connaissances font défaut, les accords environnementaux doivent être souples et régulièrement révisés. Un suivi constant est indispensable pour ne pas perdre le problème de vue, procéder à des ajustements si nécessaire et rendre compte des progrès accomplis. Il ne faut jamais présumer qu'un problème mondial a été définitivement résolu.
- Tous les acteurs de l'accord sur les CFC ont eu leur importance et seront à nouveau mis à contribution à l'avenir : un organe de négociation international comme le PNUE, un petit groupe d'États désireux de prendre les rênes de l'action politique, des entreprises souples et responsables, des scientifiques qui peuvent communiquer avec les responsables politiques et n'y manquent pas, des militants environnementaux qui ne relâchent pas la pression, des consommateurs prêts à choisir d'autres produits sur la base d'informations environnementales et des experts techniques fournissant des solutions innovantes qui rendent la vie possible, agréable et enrichissante même si des adaptations sont nécessaires pour ramener l'impact des humains en deçà des limites.
- Bien sûr, on pourra faire remarquer que dans cette histoire, tous les ingrédients du dépassement et de l'effondrement sont réunis : une croissance exponentielle, des limites environnementales érodables et de longs temps de réaction, à la fois physiques et politiques. Il aura fallu attendre 13 ans entre les

premières mises en garde des scientifiques en 1974 et la signature du Protocole de Montréal en 1987, et 13 ans encore entre cette signature et la mise en œuvre intégrale du protocole renforcé en 2000. Il faudrait peut-être davantage de temps encore pour convaincre ceux qui ne coopèrent toujours pas, les tricheurs et les contrebandiers. Et il faudra plus d'un siècle pour que le chlore ait complètement disparu de la stratosphère à partir de 2050.

Cette histoire traite du dépassement. Mais elle parle aussi de la façon dont l'humanité revient petit à petit à une attitude soutenable. Et chacun de nous espère qu'il ne s'agira pas d'une histoire d'effondrement. Pour cela, tout dépendra d'à quel point les dégâts causés à la couche d'ozone seront réversibles et de l'éventuelle survenue future de surprises atmosphériques. Cela dépendra aussi de notre capacité à rester vigilants et à entraver les efforts que les groupes d'intérêts et leurs responsables politiques feront pour échapper à certaines interdictions sur les produits chimiques appauvrissant la couche d'ozone. Si toutes ces conditions sont réunies, les hauts et les bas du trou d'ozone stratosphérique pourront alors servir d'exemple dans les confrontations qui nous opposent à d'autres limites planétaires.

CHAPITRE 6

La technologie, les marchés et le dépassement

Tout laisse penser que nous avons toujours fait la part trop belle à la contribution du génie technologique et sous-estimé celle des ressources naturelles… Nous avons besoin de quelque chose que nous avons perdu dans notre empressement à refaire le monde : un sens des limites, une prise de conscience de l'importance des ressources terrestres.

– Stewart Udall, 1980

L'*Homo sapiens* habite la Terre depuis 100 000 ans. Les humains cultivent la terre et s'organisent en cités depuis à peu près 10 000 ans. Ils assistent à la croissance exponentielle de la population et du capital depuis environ 300 ans. Au cours de ces derniers siècles, des innovations techniques et institutionnelles spectaculaires – la machine à vapeur, l'ordinateur, l'entreprise, les accords commerciaux internationaux et bien d'autres – ont permis à l'économie humaine de transcender d'évidentes limites physiques et managériales, et de poursuivre son essor. Et, tout particulièrement au cours de ces dernières dizaines d'années, le développement de la culture industrielle a fait naître dans toutes les communautés terriennes ou presque le désir et l'attente d'une croissance matérielle infinie.

L'idée de limites à la croissance est pour beaucoup impossible à envisager. Les limites sont politiquement taboues et économiquement inconcevables. Notre culture tend à nier leur existence en faisant une confiance aveugle aux pouvoirs de la technologie, au fonctionnement de l'économie de marché et à la croissance de l'économie, solution à tous les problèmes, y compris ceux qui viennent de la croissance même.

On a principalement reproché au tout premier modèle World3 de sous-estimer le pouvoir de la technologie et de ne pas reproduire de façon appropriée la résilience adaptative de l'économie de marché. Il est exact que dans ce tout premier modèle, nous n'avions pas inclus le progrès technologique à un rythme qui aurait permis de résoudre tous les problèmes liés à la croissance exponentielle de l'empreinte écologique des humains. En effet, nous ne pensons pas – aujourd'hui pas plus qu'hier – que de telles avancées technologiques verraient le jour d'elles-mêmes ou par le truchement du fonctionnement autonome « du marché ». Des progrès technologiques spectaculaires – et même suffisants – sont envisageables, mais uniquement en tant que conséquences de décisions sociétales bien précises et d'une volonté de mettre en œuvre et de financer ces décisions. Et même avec tout cela, la technologie souhaitée ne fera son apparition qu'au bout d'un important laps de temps. Voilà comment nous percevons la réalité aujourd'hui, et nous la percevions déjà ainsi il y a trente ans. World3 est donc le reflet de cette perception[1].

Il y a 20 ans, certains évoquaient des limites à la croissance. Mais aujourd'hui, nous savons que la croissance est le moteur du changement. Elle est l'amie de l'environnement.

– Président George H.W. Bush, 1992

1. Mais il reste vrai que si l'on prend pour hypothèse un progrès technologique suffisamment rapide et une mise en œuvre instantanée des nouvelles technologies, on peut résoudre tous les problèmes liés à une empreinte écologique qui ne fait que s'étendre. Nous avons décrit les changements nécessaires pour accomplir de telles avancées dans le Scénario 0 « Infinité en entrée, infinité en sortie », dans le chapitre 4.

Voici en quelques mots mes prédictions à long terme : les conditions matérielles vont continuer à s'améliorer pour la plupart des individus, dans la plupart des pays, la plupart du temps, et ce indéfiniment. D'ici un siècle ou deux, tous les pays et la majeure partie de l'humanité connaîtront un niveau de vie équivalent ou supérieur à celui des Occidentaux aujourd'hui. Mais je parie aussi sur le fait que nombreux sont ceux qui continueront à penser et à dire que les conditions de vie ne font qu'empirer.

– Julian Simon, 1997

En 1972, le Club de Rome publiait The Limits to Growth*, remettant en question la durabilité de la croissance démographique et économique. Selon ce livre, à l'heure actuelle, nous devrions assister à la baisse de la production alimentaire, du nombre d'habitants sur Terre, de la quantité d'énergie disponible et de l'espérance de vie. Aucune de ces évolutions n'a commencé à se produire et rien n'annonce qu'elles vont survenir. Donc le Club de Rome s'est trompé…*

– ExxonMobil, 2002

Le progrès technologique et le marché s'expriment de bien des façons à travers le modèle. Nous partons du principe, dans World3, que les marchés sont là pour allouer à plusieurs besoins concurrents un capital d'investissement limité, le plus souvent sans retard[2]. Certaines avancées techniques sont intégrées dans le modèle, comme le contrôle des naissances, le remplacement de certaines ressources par d'autres et la révolution verte dans le domaine agricole. Dans plusieurs scénarios, nous testons un progrès technique plus rapide et de possibles bonds technologiques qui vont au-delà des améliorations « normales ». Que se passerait-il si la matière était presque entièrement recyclée ? Si le rendement agricole doublait sans cesse ? Et si les émissions étaient réduites à 4 % par an durant le siècle à venir ?

2. Les marchés possèdent leurs propres oscillations temporaires que nous avons modélisées dans un grand nombre d'autres contextes, mais pour simplifier, nous n'avons pas intégré les instabilités monétaires à court terme dans World3 ; elles n'entretiennent pas un lien étroit avec le changement planétaire qui se déroule sur plusieurs décennies.

Même avec de telles hypothèses, notre monde modélisé a tendance à dépasser ses limites. Et même avec les technologies les plus efficaces et la résilience économique la plus élevée possible : *s'il s'agit là des seuls changements qui interviennent*, le modèle génère des scénarios d'effondrement.

Nous allons vous expliquer pourquoi dans ce chapitre. Mais avant de poursuivre, nous devons souligner le fait que nous traitons ici de problèmes qui non seulement font l'objet d'études scientifiques, mais qui renvoient pour certains à de véritables dogmes. Si nous laissons entendre que la technologie ou les marchés soulèvent des problèmes ou se heurtent à des limites, certains vont nous qualifier d'hérétiques, affirmant que nous sommes anti-technologie.

C'est tout simplement faux. Donella a fait son doctorat à l'Université d'Harvard et Dennis et Jorgen ont tous les deux fait leur thèse au Massachusetts Institute of Technology, deux institutions qui sont à la pointe des nouvelles technologies. Nous ressentons tous trois un profond respect envers les pouvoirs de la science et sommes convaincus qu'ils peuvent résoudre certains problèmes de l'humanité. Et notre travail sur cette série d'ouvrages est là pour nous rappeler les merveilles du progrès technique. En 1971, en effet, nous avons écrit *The Limits to Growth* sur des machines à écrire électroniques, nous dessinions les graphiques à la main et nous avions recours à un imposant ordinateur central pour faire fonctionner World3. Il fallait entre 10 et 15 minutes pour générer un simple scénario. En 1991, nous avons révisé notre modèle, écrit un nouveau livre, préparé des graphiques et des tableaux et fait la maquette de l'ensemble sur des ordinateurs de bureau. Nous n'avions plus besoin que de 3 à 5 minutes pour produire dans World3 un scénario s'étalant sur 200 années de simulation. Et en 2002, nous avons fait fonctionner World3 sur des ordinateurs portables, nous avons collaboré à la révision du livre via Internet et stocké tous nos résultats sur un CD-ROM. Il faut aujourd'hui environ 4 secondes pour générer un scénario. Nous comptons donc sur l'efficience de la technique pour

contribuer, en souplesse et avec le moins de sacrifices possible, à faire redescendre l'empreinte écologique des humains en deçà des limites planétaires.

Nous ne sommes pas non plus anti-économie de marché. Nous comprenons et respectons le pouvoir du marché. Deux d'entre nous sont diplômés d'une très grande école de commerce et Jorgen a été pendant huit ans président de la Norwegian School of Management. Dennis a été membre de la Tuck School of Business de Dartmouth pendant 16 ans. Nous faisons partie du conseil d'administration d'entreprises spécialisées dans les technologies de pointe. Nous avons tous fait l'expérience des problèmes et de l'absurdité des économies planifiées. Nous comptons sur l'amélioration des signaux du marché et sur celle des technologies pour permettre l'avènement d'une société durable, productive et prospère. Mais nous ne pensons pas – et rien, objectivement, ne nous y incite – que le progrès technologique ou les marchés en eux-mêmes, en l'absence d'un profond changement et d'une réorientation vers l'intelligence, le respect ou l'engagement dans la durabilité, puissent engendrer une société soutenable.

Notre foi relative dans la technologie et les marchés s'appuie sur notre connaissance des systèmes. Il s'agit d'une discipline qui consiste à exprimer avec exactitude et sous forme de modèles non linéaires constitués de boucles de rétroaction *ce qu'est la technologie* et *ce que font les marchés*. Lorsqu'il s'agit de modéliser concrètement ces systèmes, au lieu d'en rester à des généralisations hâtives à leur sujet, on découvre leurs fonctions et leur pouvoir sur le plan économique, mais aussi leurs limites.

Dans ce chapitre, nous allons donc :

- Décrire les processus de rétroaction de la technologie et des marchés tels que nous les comprenons et tels que nous les avons modélisés dans World3.
- Présenter des simulations dans lesquels nous partons de l'hypothèse qu'il y aura toujours plus de technologies efficaces pour venir à bout des limites.

- Expliquer pourquoi le dépassement et l'effondrement restent les modes comportementaux dominants de ces simulations.
- Terminer par deux courtes études de cas, l'une sur le pétrole, l'autre sur la pêche, qui démontrent que dans le monde actuel, les technologies et les marchés ne sont pas garants d'une transition en douceur vers la durabilité.

La technologie et les marchés dans le « monde réel »

Qu'est-ce, « au juste », que la technologie ? Est-ce la capacité à résoudre n'importe quel problème, la manifestation physique de l'inventivité de l'homme ? Est-ce l'augmentation, continue et exponentielle, de la quantité produite en une heure de travail ou par unité de capital, la maîtrise de la nature ? Est-ce le contrôle de certains par d'autres à l'aide de la nature comme instrument[3] ? Les modèles mentaux humains renferment toutes ces conceptions de la technologie, et bien d'autres encore.

Et qu'est-ce, « au juste », que le marché ? Certains diront que ce n'est rien d'autre que le lieu où acheteurs et vendeurs se retrouvent pour établir des prix d'échange qui expriment la valeur relative des marchandises. Pour d'autres, le marché libre est une chimère des économistes. Parmi ceux qui n'ont connu que des marchés soumis à un contrôle bureaucratique, certains diront que le marché est une institution magique qui parvient d'une manière ou d'une autre à fournir une abondance de biens de consommation. Le marché, est-ce avoir le droit et le pouvoir de posséder du capital et d'empocher les bénéfices ? Ou est-ce le moyen le plus efficient de distribuer les produits de la société ? Ou encore le dispositif grâce auquel certains en contrôlent d'autres à l'aide de l'argent ?

---

3. Nous avons repris ces mots concernant le contrôle exercé au moyen de l'instrument nature d'un des meilleurs essais qui aient jamais été écrits sur la technologie : C. S. Lewis, « The Abolition of Man », *in* Herman Daly, *Toward a Steady-State Economy*, San Francisco, Freeman Press, 1973.

Selon nous, l'enchaînement des processus ci-dessous fait partie du modèle que les individus ont le plus communément en tête lorsqu'ils affirment que la technologie et les marchés peuvent éliminer les limites à la croissance :

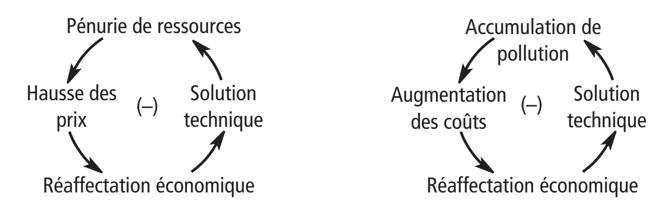
- Un problème lié aux limites survient : une ressource se raréfie ou un polluant s'accumule.
- Le marché fait grimper le prix de cette ressource comparativement aux autres ou bien l'accumulation du polluant requiert des dépenses qui se traduisent par une augmentation du prix des produits ou des services qui génèrent ce polluant. (Ici, il est généralement admis que le marché a besoin de procéder à un ajustement important afin de refléter le coût d' « externalités » comme la pollution.)
- L'augmentation du prix entraîne des réactions. Rechercher davantage cette ressource, en produire plus ou en synthétiser rapporte de l'argent respectivement aux géologues, aux biologistes et aux chimistes. Cela pousse les fabricants à remplacer cette ressource par une autre, plus abondante, et à s'appuyer davantage sur le recyclage. Cela oblige les consommateurs à se détourner des produits qui contiennent cette ressource ou à utiliser celle-ci de façon plus efficiente. Cela incite les ingénieurs à concevoir des systèmes de contrôle de la pollution, ou bien à trouver des endroits où séquestrer le polluant, ou encore à inventer des procédés de fabrication qui n'émettent pas ce polluant.
- Ces réactions, qu'on observe tant du côté de l'offre que de la demande, se font concurrence sur le marché où l'interaction entre acheteurs et vendeurs détermine quelles technologies et quels modes de consommation vont résoudre le problème le plus vite, avec le plus d'efficience et au moindre coût.
- Pour finir, le problème est « résolu ». Le système a surmonté cette raréfaction en particulier ou réduit les dégâts causés par ce polluant.

- Tout cela est possible à un coût acceptable pour la société, et survient assez vite pour que des dégâts irrémédiables n'aient pas eu le temps de se produire.

Ce modèle ne s'appuie pas uniquement sur la technologie ni uniquement sur le marché ; il fait l'hypothèse d'interactions souples et efficaces entre les deux. On a besoin que le marché signale le problème, qu'il oriente les ressources vers ses solutions et qu'il sélectionne et récompense la meilleure d'entre elles. On a également besoin de la technologie pour résoudre le problème. C'est l'ensemble qui doit fonctionner correctement. Sans les signaux du marché, il n'y a pas d'intervention de la technologie, et sans l'ingéniosité technique, les signaux du marché ne servent à rien.

Il faut également noter que ce modèle prend la forme d'une boucle de rétroaction négative : il s'agit d'un enchaînement causal qui œuvre à inverser une évolution, à corriger un problème et à restaurer un équilibre. La pénurie de ressources est surmontée. La pollution est éliminée ou séquestrée. La société peut continuer à se développer.

GRAPHIQUE 9 – Boucles de rétroaction négatives



Nous pensons que des boucles d'ajustement comme celles-ci existent bel et bien et sont importantes. Nous les avons incluses à de nombreux endroits dans World3, mais pas sous la forme d'une seule et entière variable capable de faire des miracles qui s'appellerait « technologie ». Les technologies sont néanmoins très présentes dans le modèle et ont de nombreux effets. L'amélioration des soins de santé, par exemple, est automatique dans World3.

Elle se produit et allonge l'espérance de vie chaque fois que le secteur tertiaire du monde simulé peut la financer. Des techniques de régulation des naissances apparaissent dans World3 lorsque le système de santé peut les prendre en charge et lorsqu'il y a volonté de réduire la taille des familles. L'amélioration des rendements agricoles est, elle aussi, automatique à partir du moment où la demande de nourriture n'est pas satisfaite et où le capital est disponible.

Lorsque des ressources non renouvelables se raréfient, l'économie de World3 consacre davantage de capital à en découvrir de nouvelles et à les exploiter. Nous partons du principe que le stock initial de ressources non renouvelables peut être entièrement utilisé, même si à mesure que ces dernières diminuent, il faut de plus en plus de capital pour trouver et extraire celles qui restent. Nous partons également du principe que ces ressources sont totalement interchangeables sans coût ni délai, c'est pourquoi nous les regroupons sans les distinguer.

En modifiant les chiffres du modèle, nous pouvons renforcer ou au contraire affaiblir ces ajustements marché-technologie dont nous faisons l'hypothèse. Lorsque nous n'intervenons pas, ces technologies évoluent dans le monde simulé à peu près aux mêmes stades de production industrielle par habitant que ceux auxquels elles sont apparues dans les pays les plus industrialisés.

Dans World3, le besoin de technologies intégrées – soins de santé, régulation des naissances, amélioration du rendement agricole, découverte et remplacement de ressources – est signalé avec une précision parfaite et sans délai au secteur du capital. Des fonds sont alors immédiatement alloués tant que la production industrielle ou celle de services est suffisante. Nous ne représentons pas explicitement les prix, car ils sont pour nous un signal intermédiaire dans un mécanisme d'ajustement qui fonctionne instantanément et parfaitement. Nous représentons donc le mécanisme (« la pénurie entraîne une réponse technique ») sans l'intermédiaire des prix, ce qui revient à omettre bien des retards et des imprécisions qui caractérisent les systèmes de marché « réels ».

Un certain nombre d'autres technologies dans World3 ne se mettent en œuvre que lorsqu'on les active dans des scénarios-tests. Il s'agit de l'utilisation efficiente des ressources et du recyclage, du contrôle de la pollution, des augmentations inhabituelles des rendements agricoles et du contrôle de l'érosion des sols. Lorsque nous avons conçus le modèle pour la première fois, nous ne considérions pas que ces technologies étaient suffisamment répandues pour avoir fait leurs preuves techniquement et pour pouvoir être adoptées d'emblée par quiconque en avait les moyens[4]. Nous les avons donc programmées pour qu'elles puissent être activées en discontinu à n'importe quel moment de la simulation qui paraîtrait adéquat à l'utilisateur. Quelqu'un pourrait par exemple partir de l'hypothèse que le monde entier va tout particulièrement s'impliquer dans le recyclage en 2005 ou faire des efforts concertés contre la pollution en 2015. Dans la version actuelle de World3, ces technologies sont modélisées en tant que « technologies adaptatives » et évoluent selon qu'il y a un besoin accru en ressources ou en nourriture, ou qu'il faut faire baisser la pollution dans le monde tel que simulé[5]. C'est cependant à l'utilisateur de déterminer l'intensité de ces réponses technologiques. Ces technologies « à la demande » nécessitent du capital et elles n'entrent en jeu qu'après une période de développement et de mise en œuvre qui est normalement fixée à 20 ans.

---

4. Cette hypothèse date de 1970 et, à l'époque, nous intégrions ces technologies en discontinu dans l'année de simulation 1975. Lorsque nous sommes arrivés à la vraie année 1990, certaines de ces technologies avaient commencé à être intégrées de façon structurelle dans l'économie mondiale. Nous avons donc procédé à des ajustements permanents des chiffres de World3 ; nous avons ainsi considérablement réduit l'utilisation de ressources par unité de production industrielle. Ces ajustements sont expliqués en détail dans l'annexe du livre de Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows et Jorgen Randers, *Beyond the Limits, op. cit.*

5. Nous avions déjà utilisé ce terme « technologies adaptatives » au début des années 1970 dans le rapport technique sur *Limits to Growth*. Voir Dennis L. Meadows *et al., Dynamics of Growth in a Finite World, op. cit.*

L'un des avantages qu'offre un modèle informatique est de permettre d'essayer différentes hypothèses, d'explorer différents futurs. On peut ainsi prendre le Scénario 2, qui est le dernier que nous avons présenté dans le chapitre 4 et dans lequel la croissance était stoppée par une très forte pollution, et poser la question suivante : que se serait-il passé si ce monde simulé avait réagi à l'augmentation de la pollution en procédant plus tôt à de substantiels investissements dans les technologies de contrôle de la pollution ? Le Scénario 3, figure 6-1, répond à cette question.

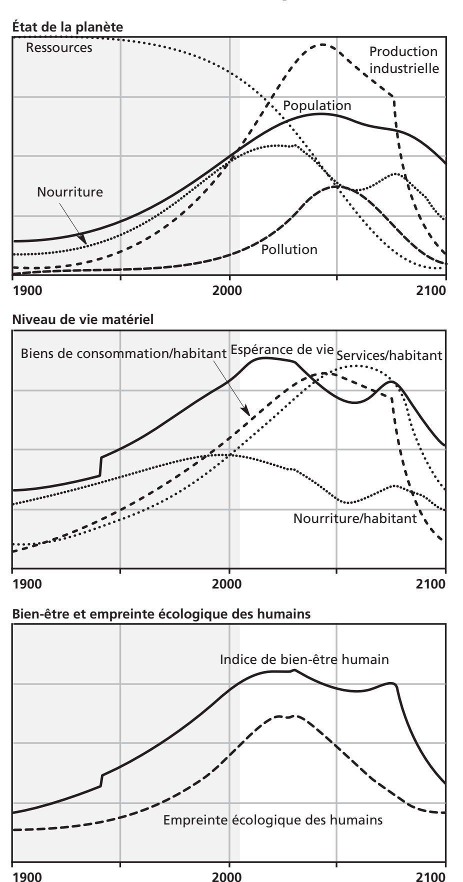
Repousser les limites grâce à la technologie dans World3

Dans le Scénario 3 et dans tous les scénarios suivants de cet ouvrage, nous continuons à partir de l'hypothèse qui nous a servi de base pour le Scénario 2 : une plus grande quantité de ressources non renouvelables et des technologies d'extraction en constant progrès. Concrètement, cela signifie que nous partons du principe qu'il y a suffisamment de ressources non renouvelables en 2000 pour entretenir 150 années de consommation à un rythme égal à celui de l'année 2000. Ces ressources sont obtenues à un coût annuel correspondant environ à 5 % de la production industrielle. Le Scénario 2 constitue donc une base de comparaison pour les changements technologiques et politiques qui vont suivre.

Nous introduisons un changement à la fois – d'abord les technologies de contrôle de la pollution, puis celles qui contribuent à l'amélioration du rendement agricole, etc. – non parce que nous pensons que la planète ne va appliquer qu'une technologie à la fois, mais parce que ce mode de progression permet de mieux comprendre les réactions du modèle. C'est de cette façon que nous procédons avec World3 : nous comprenons ainsi mieux les effets séparés de chaque changement, puis nous essayons de comprendre tous les effets combinés et leurs interactions.

Pour de nombreux économistes, la technologie est un exposant d'une variante de la fonction de production de Cobb-Douglas : elle fonctionne automatiquement, sans délai ni coût ni limite et ne

FIGURE 6-1 – Scénario 3 : des ressources non renouvelables plus accessibles et des techniques de contrôle de la pollution



Dans ce scénario, nous formulons la même hypothèse que dans le Scénario 2, à savoir un approvisionnement abondant en ressources, mais nous ajoutons une technologie de contrôle de la pollution de plus en plus efficace, ce qui permet une réduction de la quantité de pollution générée par unité de production allant jusqu'à 4 % par an à partir de 2002. Cela se traduit par un bien-être bien plus élevé pour davantage d'individus après 2040, grâce à la baisse des effets néfastes de la pollution. Mais la production de nourriture finit par décliner, elle puise du capital dans le secteur industriel et provoque un effondrement.

produit que des résultats souhaitables. Rien d'étonnant, donc, à ce que les économistes soient si convaincus de son potentiel à résoudre les problèmes des humains ! Dans le « monde réel », cependant, la technologie n'a pas ces merveilleuses propriétés. Les techniques que nous observons s'adressent chacune à un problème bien particulier ; elles coûtent de l'argent et leur mise au point prend du temps. Une fois qu'elles ont fait leurs preuves en laboratoire, il faut encore du temps pour trouver le capital, la main-d'œuvre, le personnel de vente et de service et mettre en place les mécanismes de marketing et de financement qui sont nécessaires pour que ces techniques connaissent une large diffusion. Elles ont souvent des effets secondaires négatifs, qui arrivent après coup et ne peuvent pas être anticipés. Et les meilleures d'entre elles sont jalousement gardées par ceux qui en ont le brevet et qui les diffusent souvent pour un coût exorbitant et selon des accords de distribution très restrictifs.

Il n'est pas possible, et cela ne présenterait pas d'intérêt, de représenter la technologie dans toute sa diversité dans World3. Nous avons, à la place, représenté son processus de progression dans le domaine de la lutte contre la pollution, de l'utilisation des ressources et du rendement agricole à l'aide de trois paramètres généraux communs à ces domaines : l'objectif final, le taux annuel d'amélioration dans le meilleur laboratoire et le délai moyen entre la disponibilité en laboratoire et l'usage généralisé sur le terrain. Au fur et à mesure que nous décrirons les scénarios, nous vous dirons quelles technologies ont été activées. Pour chaque simulation, nous partirons de l'hypothèse que lorsque besoin il y a, l'amélioration de la technologie en laboratoire peut atteindre les 4 % par an. Nous estimons qu'il faut en moyenne 20 ans pour qu'un nouveau potentiel soit universellement diffusé et passe du laboratoire au stock de capital de la production mondiale. Le tableau 6-1 montre les conséquences de ces hypothèses en matière d'émissions de polluants persistants dans le Scénario 3.

Supposons qu'un certain stock de capital agricole et industriel émette en l'an 2000 1 000 unités de pollution persistante. Si la

TABLEAU 6-1 – Impact de la technologie sur les émissions de polluants persistants dans World3

Année	Réduction en pourcentage
2000	0 %
2020	10 %
2040	8 %
2060	75 %
2080	89 %
2100	95 %

Lorsque la technologie peut se développer de 4 % par an en laboratoire, et être mise en œuvre au sein du stock de capital mondial dans un délai de 20 ans en moyenne, il devient possible de réduire rapidement les émissions par rapport à leur niveau normal. Ce tableau montre les pourcentages de réduction qui peuvent être obtenus dans le Scénario 3 de World3 une fois que la population a commencé, en 2002, à réduire la pollution au taux maximum autorisé par les progrès technologiques.

technologie s'améliore de 4 % par an et que le délai de diffusion est en moyenne de 20 ans, ce même stock de capital ne produira que 900 unités de pollution persistante en 2020. Ces émissions auront diminué de moitié en 2040 et seront tombées à seulement 5 % de leur valeur de départ en 2100. On obtient les mêmes résultats en matière de rendement agricole et d'efficience de l'utilisation des ressources lorsque les technologies propres à ces deux secteurs sont activées dans World3.

Dans le Scénario 3, nous supposons que lors de l'année de simulation 2002, et avant que le niveau de la pollution dans le monde soit assez haut pour causer des dégâts importants sur la santé ou les cultures, la planète décide de ramener la pollution aux niveaux qui prévalaient au milieu des années 1970 et consacre systématiquement du capital à cette fin. Elle choisit donc une approche « en fin de cycle », réduisant la pollution au point d'émission plutôt qu'à la source. Les réductions d'émissions sont celles qui sont présentées dans le tableau 6-1, et elles s'accompagnent d'une augmentation des coûts d'investissement qui atteint les 20 %. En 2100, le niveau de la pollution est ramené à celui, relativement bas, du début du XXIe siècle.

Dans ce scénario, la pollution continue à augmenter pendant près de 50 ans malgré les mesures de lutte, à cause des délais de mise en application et de la poursuite de la croissance de la production industrielle. Mais les niveaux de pollution restent bien en deçà du Scénario 2. Ils ne menacent à aucun moment la santé humaine, si bien que cet « effort mondial antipollution » parvient à prolonger d'une génération l'ère de la démographie et du bien-être élevés. La période faste s'achève en 2080, soit 40 ans plus tard que dans le Scénario 2, comme le montre l'indice de bien-être humain qui chute alors brutalement. Mais la pollution s'en prend aux cultures plus tôt au cours du siècle. Les rendements ne baissent pas immédiatement, car la diminution de la fertilité des sols est en partie compensée par une utilisation plus soutenue d'intrants agricoles. Ce phénomène pourrait se traduire dans le « monde réel » par l'utilisation de chaux contre les pluies acides, celle d'engrais pour compenser la moindre production de nutriments par les micro-organismes des sols, empoisonnés par les pesticides, et le recours à l'irrigation face à des précipitations perturbées par le changement climatique.

La tendance à la baisse de la fertilité des sols, compensée par l'utilisation accrue d'intrants agricoles conduit, dans le Scénario 3, à une production de nourriture dans l'ensemble stable entre les années de simulation 2010 et 2030. La population continue cependant de croître, si bien que la quantité de nourriture par habitant diminue. Mais pendant plusieurs décennies, la production de l'industrie et celle du secteur tertiaire demeurent suffisantes pour maintenir un niveau de vie acceptable et ce, malgré les dépenses nécessaires en capital dans l'agriculture et, par la suite, dans le contrôle de la pollution. Durant le dernier tiers du XXIe siècle, la pollution a tellement diminué que les terres recouvrent leur fertilité. Mais la pression démographique est forte et la surface de terres arables baisse à cause de l'étalement urbain et de l'érosion. En outre, à partir de la seconde moitié du siècle, la production industrielle chute rapidement, car une trop grande quantité de capital a dû être investie dans l'agriculture et la lutte contre la

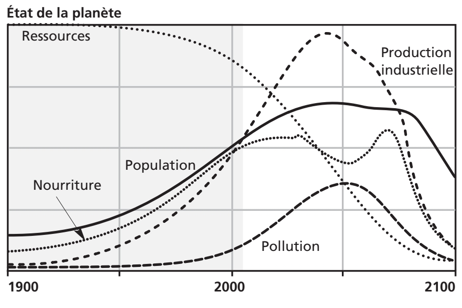
pollution et il n'en reste donc plus assez pour compenser la dépréciation. L'économie décline et l'effondrement s'installe, exacerbé à la fin du siècle par la raréfaction croissante des ressources non renouvelables.

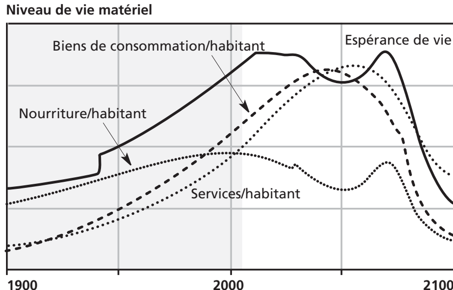
La planète décrite par le Scénario 3 réduit considérablement les niveaux de pollution et parvient à maintenir pendant longtemps un indice de bien-être humain élevé. Mais la nourriture finit par poser problème. On peut donc qualifier ce scénario de « crise alimentaire ». Bien évidemment, dans la « vraie vie », des mesures seraient prises pour maintenir la quantité d'aliments disponibles au niveau souhaité. Que se passerait-il si la planète utilisait sa puissance technologique pour produire davantage de nourriture ? C'est ce que nous montre la figure 6-2 à travers le Scénario 4.

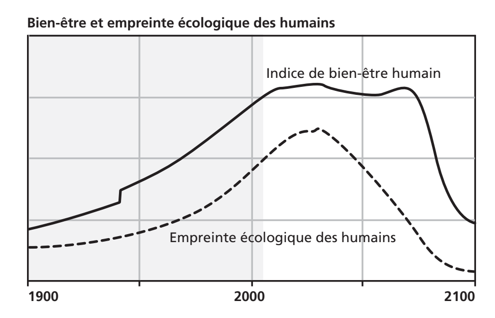
Ici, le programme de lutte contre la pollution du Scénario 3 est à nouveau activé. Dans le même temps, la communauté internationale décide en 2002 de réagir de façon énergique face à la stagnation de la quantité de nourriture par habitant qui dure depuis le début des années 1990. On investit donc dans des technologies destinées à augmenter le rendement agricole. Ces nouvelles technologies ont besoin d'en moyenne 20 ans pour être mises en œuvre dans les exploitations du monde entier et pour entraîner une augmentation des rendements d'au maximum 4 % par an là où c'est nécessaire. Cet investissement dans la technologie accroît les coûts de 6 % en 2040 et de 8 % en 2100. On n'enregistre pas de forte hausse des rendements jusqu'en 2050, car il y a assez de nourriture. Mais à partir de la seconde moitié du siècle, les rendements moyens augmentent de façon spectaculaire, conséquence du caractère exponentiel des avancées technologiques supposées.

Il en résulte une longue période de démographie soutenue et de bien-être humain élevé autour de 2050. Les nouvelles technologies agricoles contribuent à augmenter la production de nourriture à partir de 2050 (contrairement au Scénario 3), mais ne résolvent pas le problème alimentaire. La détérioration de la

FIGURE 6-2 – Scénario 4 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution et une amélioration des rendements agricoles







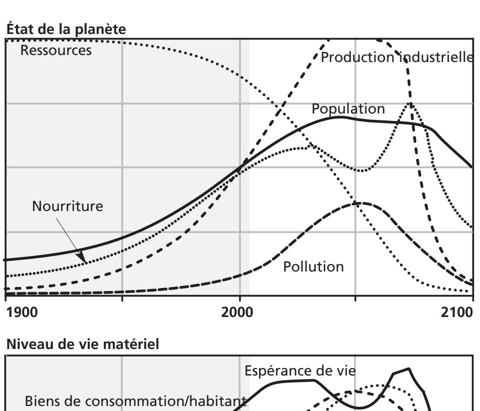
Si le monde modélisé ajoute à ses techniques de contrôle de la pollution une batterie de technologies destinées à augmenter grandement la production alimentaire par unité de terre, l'intensité agricole devenue très élevée accélère la disparition des terres. Les agriculteurs du monde entier essayent alors d'obtenir une production de nourriture toujours plus grande à partir de surfaces en constante diminution, ce qui ne se révèle pas soutenable.

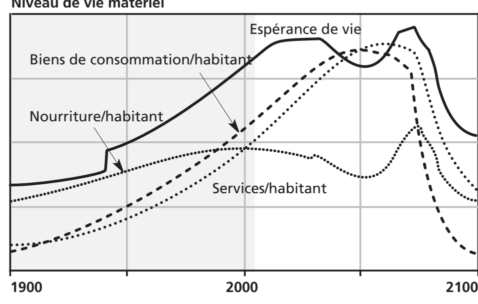
fertilité des sols et la perte de terres arables du fait de l'érosion et de l'expansion urbaine et industrielle finissent pas annuler les effets positifs des nouvelles technologies sur les rendements, et la production totale de nourriture diminue après 2070. L'intensité agricole élevée qui caractérise ce monde simulé entraîne une érosion extrêmement rapide, érosion qui ne se traduit pas seulement par une disparition des terres, mais aussi par une perte de nutriments, un tassement des sols, leur salinisation et d'autres phénomènes qui réduisent leur productivité.

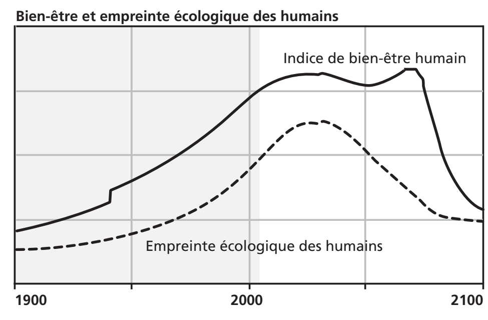
Disposant de moins de terres, les agriculteurs essaient d'obtenir un rendement plus élevé de celles qu'il leur reste. Cette intensité agricole accrue entraîne davantage d'érosion encore dans une boucle de rétroaction positive qui tire le système agricole vers le bas. Le Scénario 4 décrit ainsi une « crise de l'érosion des sols » qui est à son maximum après 2070, lorsque survient une chute catastrophique des surfaces de terres arables. Cette chute ne peut être enrayée à temps par des technologies destinées à améliorer les rendements et la pénurie alimentaire provoque la baisse de la population. Le secteur agricole, en plein stress, puise toujours plus de capital et de ressources humaines dans l'économie à un moment où le stock de ressources non renouvelables est en baisse et nécessite lui aussi du capital. Un effondrement quasi total survient avant 2100.

Assurément, aucune société normalement constituée ne persévérerait dans une technique agricole qui augmente les rendements mais détruit la terre. Il existe pourtant des exemples de ce type de comportement dans le monde d'aujourd'hui (ainsi, les terres perdues du fait de l'accumulation de sel dans la Vallée centrale de Californie tandis que non loin de là, on exige des sols toujours plus de rendement). Mais partons de l'hypothèse que les générations futures sauront se montrer plus raisonnables et ajoutons des techniques de protection des terres au contrôle de la pollution et aux technologies à haut rendement. Le Scénario 5, figure 6-3, nous montre ce qui résulte de cet ajout.

FIGURE 6-3 – Scénario 5 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution, une amélioration des rendements agricoles et une protection contre l'érosion des sols







Une technique de préservation des terres est à présent ajoutée aux mesures déjà en place visant à augmenter les rendements et à réduire la pollution. Cela entraîne un léger report de l'effondrement à la fin du XXIe siècle.

Ici, nous faisons l'hypothèse qu'aux technologies de réduction de la pollution et d'augmentation des rendements vient s'ajouter à partir de 2002 un programme de lutte contre l'érosion des sols de la planète. Les deux premiers programmes, souvenons-nous, nécessitent des dépenses supplémentaires en capital. Mais nous partons de l'hypothèse que ce n'est pas le cas du troisième, car il repose essentiellement sur des techniques agricoles plus douces pour allonger la durée de vie productive des sols.

Il faut attendre 2050 pour que ce programme ait un impact véritablement positif ; à cette date, les taux d'érosion baissent de façon spectaculaire suite à l'amélioration des techniques agricoles. Si ce résultat permet de prolonger un peu au-delà de 2070 la période de bien-être humain, il n'est pour autant pas soutenable. Le Scénario 5 se termine en effet par un effondrement causé par plusieurs crises plus ou moins simultanées : crise des ressources, crise de la nourriture et coûts élevés. Jusqu'aux alentours de 2070, le bien-être humain moyen reste relativement élevé, malgré des hauts et des bas regrettables en ce qui concerne ses divers composants. La nourriture est suffisante dans les grandes lignes (bien que peu abondante durant le deuxième tiers du siècle), la pollution est tolérable (bien que plutôt élevée durant la même période), l'économie se développe (au moins jusqu'en 2050), on constate une plus grande offre de services et l'espérance de vie se maintient au-dessus de 70 ans. Mais après 2070, le coût des différentes technologies, auquel s'ajoute l'augmentation du coût d'obtention des ressources non renouvelables devenues de plus en plus rares nécessitent plus de capital que l'économie ne peut en fournir. Le résultat est un déclin assez abrupt. Le Scénario 5 peut donc être décrit comme la somme de nombreuses crises.

On peut se demander ce qu'un pays à ce point sous pression abandonnerait en premier comme priorité. Laisserait-il les terres s'éroder, la pollution augmenter ou s'accommoderait-il de moins de matières premières ? World3 part de l'hypothèse que les matières et les carburants seraient largement prioritaires afin de permettre à la production industrielle de continuer et de soutenir

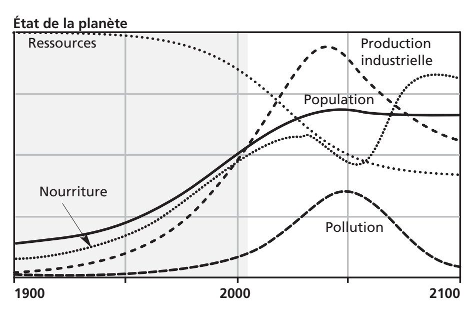
l'investissement dans les autres secteurs de l'économie. Ce type d'orientation, tout comme le comportement précis du modèle une fois que le capital d'investissement est devenu insuffisant n'ont pas d'importance. Nous ne prétendons pas pouvoir prédire ce que la planète ferait si elle se retrouvait dans une situation aussi délicate, et nous ne nous préoccupons plus des simulations à partir du moment où une variable importante entame un rapide déclin. Ce qui est important, c'est que ce type de difficultés puisse arriver et que les humains vont peut-être bien s'y trouver confrontés.

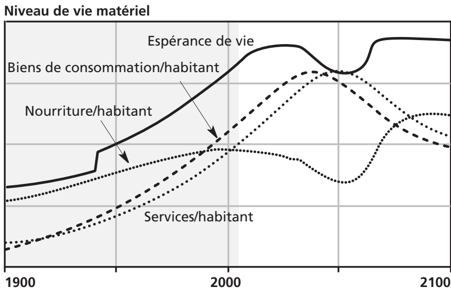
Si la pénurie de ressources non renouvelables est l'épreuve ultime qui provoque l'effondrement dans le Scénario 5, des technologies permettant de préserver les ressources et venant s'ajouter à toutes les autres devraient apporter une aide. Voyons ce que cela entraîne avec le Scénario 6, figure 6-4.

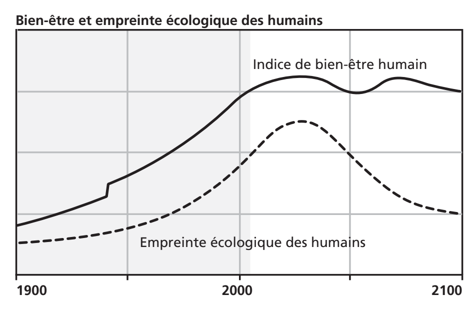
Nous lançons, lors de l'année de simulation 2002, un programme de réduction des quantités de ressources non renouvelables nécessaires par unité de production industrielle ; cette réduction peut aller jusqu'à 4 % par an. Nous conservons les programmes d'amélioration du contrôle de la pollution, d'augmentation des rendements agricoles et de réduction de l'érosion des sols. Il s'agit en somme, pour le XXIe siècle, d'un vaste programme d'éco-efficience dont le coût est élevé (les coûts d'investissement se sont élevés de 20 % en 2050 et de 100 % à l'approche de 2090), mais dont l'objectif est une importante réduction de l'empreinte écologique des humains.

Cette puissante association de technologies permet d'éviter l'effondrement du Scénario 5 lors du troisième tiers du XXIe siècle. Mais elle arrive un peu trop tard pour empêcher une baisse progressive du bien-être humain à la même période. La population ne diminue pas de manière significative, mais l'espérance de vie baisse aux alentours de 2050. Dans le même temps, la pollution, qui a augmenté, s'attaque à la fertilité des sols et la production de nourriture est faible ; mais ce phénomène est annulé par l'augmentation des rendements agricoles et les technologies de lutte

FIGURE 6-4 – Scénario 6 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution, une amélioration des rendements agricoles, une protection contre l'érosion des sols et une technologie permettant l'utilisation efficiente des ressources







Notre monde simulé dispose à présent de puissantes technologies pour, tout à la fois, réduire la pollution, augmenter les rendements, protéger les terres et préserver les ressources non renouvelables. Ces technologies ont toutes un coût et ne sont totalement mises en œuvre qu'au bout de 20 ans. Ensemble, elles rendent possible un monde assez peuplé et prospère jusqu'à ce que la situation commence à se dégrader du fait de leur coût.

contre la pollution. Les ressources non renouvelables diminuent plus lentement et leur coût reste bas. Au terme d'un XXIe siècle quelque peu compliqué, une population stable comptant un peu moins de 8 milliards d'individus vit dans un monde façonné par les technologies de pointe et peu pollué, dont l'indice de bien-être humain est à peu près le même qu'en 2000. L'espérance de vie et la quantité de nourriture par habitant sont plus élevées, l'offre de services est la même, mais les biens de consommation par habitant atteignent un chiffre plus bas qu'au début du siècle. La production industrielle entame un déclin vers 2040, car les dépenses nécessaires pour lutter contre la faim, la pollution, l'érosion et la pénurie de ressources augmentent, ce qui réduit le capital consacré à la croissance. La production de services par habitant et le niveau de consommation matérielle commencent aussi à baisser peu après. En fin de compte, ce monde simulé ne parvient pas à maintenir son niveau de vie, car la technologie, les services sociaux et les nouveaux investissements sont tous devenus trop chers en même temps. Le monde est face à une crise des coûts.

Quelques bémols

Après avoir travaillé pendant un certain temps avec un modèle, qu'il soit informatique ou mental, il peut être utile de prendre du recul et de se souvenir que ce n'est pas à partir du « monde réel » que les différentes expériences ont été menées, mais à partir d'une représentation qui est « réaliste » par certains côtés et « irréaliste » par d'autres. Il s'agit alors de tirer des enseignements à partir des aspects des scénarios qui semblent « réalistes ». Il est également important de jauger dans quelle mesure les incertitudes ou les simplifications délibérées du modèle apportent un bémol à ses enseignements. À l'issue de cette première série de scénarios, nous devons donc faire une pause et mettre les choses en perspective.

Il faut se souvenir que World3 ne fait pas la distinction entre les zones riches et les zones pauvres de la planète. Tous les signaux d'une pénurie alimentaire, d'une pénurie de ressources et d'une

accumulation de pollution concernent donc le monde dans son ensemble et suscitent des réactions qui mobilisent les facultés de défense du monde toujours dans son ensemble. Cette simplification rend le modèle très optimiste. Dans le « monde réel », si la faim touche avant tout l'Afrique, si la pollution frappe essentiellement l'Europe centrale, si la dégradation des sols se produit surtout dans les pays tropicaux et si les populations qui sont les plus touchées par les problèmes sont aussi celles qui ont le moins de ressources économiques ou techniques pour y faire face, on enregistrera des délais très longs avant que les problèmes ne soient résolus. C'est pourquoi il peut arriver que le système « réel » ne réagisse pas avec autant de détermination et de réussite que le système dans World3.

Ce modèle, avec son marché qui fonctionne parfaitement et ses technologies appliquées en douceur et avec succès (et dépourvues de tout effet secondaire négatif) est là encore très optimiste. Tout comme l'hypothèse selon laquelle les décisions politiques sont prises instantanément et sans entraîner aucun coût. Souvenons-nous également que World3 n'a pas de secteur militaire consommant de l'argent et des ressources qui iraient autrement à l'économie productive. Il n'y a pas non plus de guerres qui font des morts, détruisent le capital et les terres et engendrent de la pollution. Pas plus qu'il n'y a de querelles ethniques, de grèves, de corruption, d'inondations, de tremblements de terre, d'éruptions volcaniques, d'accidents nucléaires, d'épidémie de sida ni de problèmes environnementaux auxquels on ne s'attendait pas. Voilà pourquoi ce modèle est à bien des égards excessivement optimiste. Il représente le « monde réel » au maximum de ses potentialités.

D'un autre côté, certains vont trouver que les technologies dans notre modèle sont trop limitées. Ils aimeraient les actionner beaucoup plus vite et même *ad libitum* (comme dans notre Scénario 0). Nos hypothèses concernant les ressources qu'on peut découvrir, les terres qu'on peut exploiter et la pollution qu'on peut absorber sont peut-être trop restrictives. Ou au contraire trop

optimistes. Nous nous sommes en tout cas efforcés de les rendre « réalistes » à partir des données dont nous disposions et de notre propre évaluation des possibilités techniques.

Étant donné toutes ces approximations, il ne faut évidemment pas étudier les courbes des différents scénarios en partant du principe qu'elles présentent une quelconque précision quantitative. Il ne faut pas accorder d'importance, selon nous, au fait que la crise alimentaire se déclenche avant la crise des ressources dans le Scénario 3. Cela aurait très bien pu être l'inverse. Nous ne disons pas que la baisse de la production industrielle va intervenir en 2040 comme dans le Scénario 6. Les chiffres dont nous disposons avec World3 (ce serait aussi le cas avec n'importe quel autre modèle) ne sont pas assez fiables pour être interprétés de cette façon.

Dès lors, que pouvons-nous retirer de ces exercices de modélisation ?

Pourquoi la technologie et les marchés ne peuvent à eux seuls empêcher l'effondrement

On pourrait résumer ces différents scénarios en disant que l'empreinte écologique de l'humain tend à s'élever au-dessus du niveau soutenable et que ce phénomène déclenche une diminution forcée de cette même empreinte. Normalement, cette diminution s'accompagne d'une baisse du niveau de vie moyen due à un approvisionnement moindre en nourriture, à un moins grand nombre de bien industriels et de services par habitant ou à une plus grande pollution de l'environnement. La réaction humaine normale est d'essayer de supprimer cette limite dans l'espoir que la croissance de la population et de l'économie puisse se poursuivre.

L'un des enseignements à tirer des six simulations précédentes est que dans un monde complexe et fini, lorsqu'on supprime ou repousse une limite pour permettre à la croissance de continuer, on en rencontre une autre. Et lorsque la croissance est exponentielle, cette autre limite arrive étonnamment vite. Il y a en fait des

strates de limites. World3 n'en contient qu'un petit nombre. Le « monde réel », lui, en contient bien plus dont la plupart sont distinctes, ont des spécificités particulières et sont locales. Seulement quelques limites, comme celles qui concernent la couche d'ozone ou le climat de la planète, ont une portée véritablement mondiale.

On pourrait s'attendre à ce que des zones différentes du « monde réel », en poursuivant leur croissance, rencontrent des limites différentes, dans un ordre différent et à des moments différents. Nous pensons pour notre part que ces *limites successives et multiples* se manifesteraient partout à la fois, comme cela se produit dans World3. Dans une économie de plus en plus mondialisée, une société qui subit un stress à un endroit envoie des ondes qui sont ressenties partout. De plus, la mondialisation accroît la probabilité que les différentes zones de la planète qui commercent activement les unes avec les autres atteignent de nombreuses limites plus ou moins simultanément.

Les scénarios montrent également qu'il est possible de faire baisser l'empreinte écologique des humains en développant et en utilisant des technologies qui réduisent les flux de matière et d'énergie requis par l'industrie et l'agriculture. Lorsque ces technologies sont mises en œuvre à grande échelle, elles permettent aux humains d'atteindre un niveau de vie plus élevé tout en gardant la même empreinte. Il s'agit là de la dématérialisation tant vantée de l'économie mondiale moderne.

Le deuxième enseignement est que plus un pays parvient à retarder ses limites grâce à des adaptations économiques et techniques, plus il risque de se heurter à plusieurs d'entre elles à la fois. Dans la plupart des scénarios de World3, y compris dans beaucoup de scénarios que nous ne montrons pas ici, le système mondial ne finit pas par être totalement à court de terres, de nourriture ou de ressources ni par perdre totalement sa capacité à absorber la pollution. Ce qui finit par lui manquer, c'est sa *capacité à s'en sortir.*

La « capacité à s'en sortir » est représentée dans World3, quoique trop simplement, par la quantité de production industrielle qui peut chaque année être investie dans la résolution de problèmes. Dans le « monde réel », bien d'autres éléments déterminent la capacité à s'en sortir : le nombre d'individus ayant une formation ; leur motivation ; l'attention des politiques et leur détermination ; la capacité à accepter un risque financier ; la capacité des institutions à développer, diffuser et assurer la maintenance de nouvelles technologies ; les capacités de gestion ; la capacité des médias et des responsables politiques à rester concentrés sur les problèmes cruciaux ; le consensus parmi les électeurs sur les grandes priorités ; la capacité des individus à regarder loin devant pour anticiper les problèmes. Toutes ces facultés peuvent se développer avec le temps si la société investit dans leur développement. Mais à un moment ou à un autre, elles atteignent leur limite. Elles ne peuvent traiter qu'un certain nombre de difficultés. Des problèmes – qui pourtant pourraient en théorie être résolus individuellement – peuvent déborder « la capacité à s'en sortir » des humains s'ils surviennent et se multiplient de façon exponentielle.

Le *temps* est en fait la limite suprême dans World3, et dans le « monde réel » aussi, selon nous. Si on lui laisse suffisamment de temps, l'humanité peut, à nos yeux, résoudre quasiment tous les problèmes. La croissance, surtout lorsqu'elle est exponentielle, est terriblement insidieuse, car elle réduit le temps de l'action efficace. Elle ne fait que stresser encore un système, de plus en plus vite, jusqu'à ce que les mécanismes, qui avaient fait leurs preuves lorsque le rythme était moins soutenu, se dérèglent.

Il y a trois autres raisons qui expliquent que la technologie et les mécanismes du marché, qui en temps normal fonctionnent bien, ne puissent pas résoudre les problèmes générés par une société qui avance vers un réseau de limites à un rythme exponentiel. Elles ont trait aux objectifs, aux coûts et aux délais. La première raison est que les marchés et les technologies ne sont que des outils au service des objectifs, de l'éthique et de l'horizon

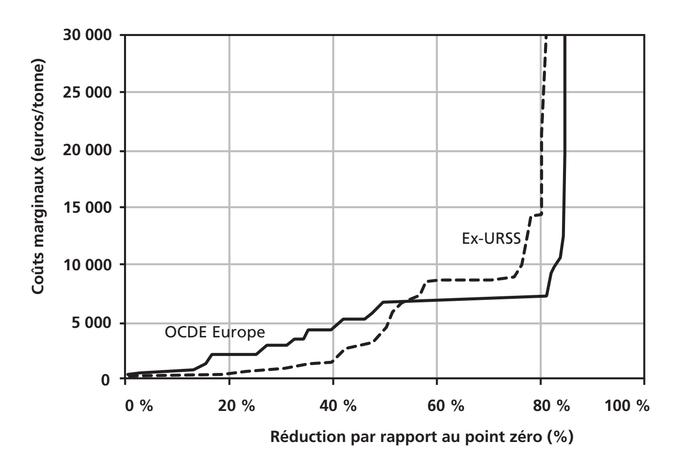
temporel de la société dans son ensemble. Si les objectifs implicites d'une société sont d'exploiter la nature, d'enrichir les élites et de faire fi du long terme, alors cette société développera des technologies et des marchés qui détruiront l'environnement, creuseront le fossé entre les riches et les pauvres et privilégieront les gains à court terme. En résumé, cette société va développer des technologies et des marchés qui vont précipiter son effondrement au lieu de l'éviter.

La deuxième raison de la vulnérabilité de la technologie est que les mécanismes d'ajustement ont un coût. Le *coût* de la technologie et des marchés dépend des ressources, de l'énergie, de l'argent, de la main-d'œuvre et du capital. Ces coûts ont tendance à augmenter de façon non linéaire à mesure qu'on approche des limites. Ce phénomène explique lui aussi le comportement parfois surprenant d'un système.

Nous avons déjà montré grâce aux figures 3-19 et 4-7 comment les déchets produits et l'énergie nécessaire pour extraire des ressources non renouvelables augmentent de façon spectaculaire à mesure que le minerai s'appauvrit. La figure 6-5 montre l'ascension fulgurante d'une autre courbe : celle des coûts marginaux par tonne lorsqu'on s'attaque aux émissions d'oxyde d'azote. Il est relativement peu coûteux de réduire de près de 50 % les émissions. Le coût augmente mais reste raisonnable quand on passe à près de 80 % et ensuite, on atteint une limite, un seuil au-delà duquel les coûts augmentent considérablement.

De futures avancées techniques permettront sans doute de repousser la verticalité de la courbe vers la droite et de rendre abordable un traitement plus complet. Une technologie différente, éliminant entièrement les fumées, donnerait peut-être naissance à de nouvelles émissions qui renverraient à une nouvelle courbe des coûts de dépollution. Quoi qu'il en soit, ces courbes auront toujours plus ou moins la même forme, car il existe des raisons physiques incontournables qui expliquent que ces coûts de dépollution grimpent en flèche lorsqu'on cherche une réduction de 100 %, c'est-à-dire lorsqu'on veut atteindre zéro

FIGURE 6-5 – Le coût non linéaire de la dépollution



On peut supprimer des émissions une quantité importante d'oxyde d'azote (NO_x), un polluant atmosphérique, pour un coût peu élevé, mais à partir d'un certain taux, les coûts de dépollution montent en flèche. Cette courbe des coûts marginaux de dépollution du NO_x, en euros par tonne, est réalisée d'après les chiffres des pays d'Europe membres de l'OCDE et les chiffres de l'ex-URSS. **(Source : J. R. Alcamo et al.)**

émission. Le nombre grandissant de cheminées et de tuyaux d'échappement nous garantissent que les humains feront l'expérience de ces coûts élevés. On peut se permettre financièrement de diviser par deux la quantité de polluants par voiture, mais si le nombre de véhicules double, la quantité de polluants par voiture devra à nouveau être divisée par deux simplement pour conserver la même qualité de l'air. Deux doublements du nombre de voitures nécessitent une diminution de 75 % de la pollution et à trois doublements, c'est 87,5 % de la pollution qu'il faut éliminer.

C'est pourquoi à partir d'un certain moment, on ne peut plus dire que la croissance va permettre à l'économie d'être assez riche pour financer la dépollution. La croissance entraîne en réalité l'économie dans une augmentation non linéaire des coûts jusqu'au moment où toute dépollution supplémentaire ne peut plus

être financée. Arrivée à ce stade, une société raisonnable stopperait l'expansion de son activité puisque la poursuite de la croissance n'améliore plus le bien-être de ses citoyens.

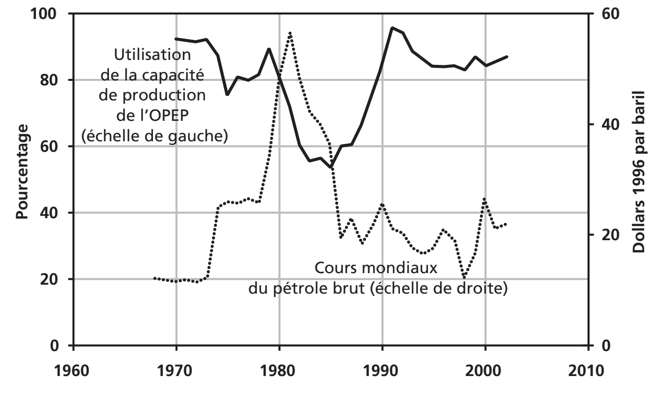
La troisième raison pour laquelle la technologie et les marchés ne peuvent résoudre ces problèmes automatiquement tient au fait qu'ils fonctionnent au moyen de boucles de rétroaction avec distorsion de l'information et retards. Les *temps de réaction* des marchés et de la technologie peuvent être bien plus longs que ce que suggèrent les théories économiques ou les modèles mentaux. Et les boucles de rétroaction technologie-marché sont elles-mêmes sources de dépassement, d'oscillations et d'instabilité. Cette dernière s'est notamment manifestée – et le monde entier a été touché – à travers la fluctuation des prix du pétrole qui a duré plusieurs dizaines d'années à partir de 1973.

Un exemple d'imperfection du marché : le turbulent marché du pétrole

Il existe de nombreuses raisons au choc pétrolier de 1973, mais la principale reste la pénurie mondiale de capital de production (puits de pétrole) par rapport au capital de consommation (véhicules, fours industriels et autres équipements fonctionnant à partir de la combustion du pétrole). Pendant les années 1970, les puits de pétrole du monde entier ont travaillé à plus de 90 % de leur capacité. C'est pourquoi l'agitation politique qui, au Moyen-Orient, a entraîné la fermeture d'une toute petite fraction des puits de pétrole de la planète n'a pas pu être compensée par une augmentation de la production ailleurs. Cela a donné aux pays de l'OPEP l'occasion d'augmenter les prix, occasion qu'ils n'ont pas laissé passer.

Cette hausse des prix, ainsi que celle qui s'est produite pour les mêmes raisons en 1979 (voir figure 6-6), a entraîné des réactions économiques et techniques en cascade. Sur le front de l'offre, on a foré davantage de puits et augmenté la capacité de pompage en dehors de la zone de l'OPEP. Certains gisements marginaux

FIGURE 6-6 – Utilisation de la capacité de production de pétrole de l'OPEP et cours mondiaux du brut



La capacité de production de l'OPEP était pour l'essentiel mobilisée dans les années 1970, si bien que de petites interruptions d'approvisionnement ont entraîné des variations soudaines et extrêmes des prix. Ces oscillations se sont produites sur plus de 10 ans, provoquant dans le monde entier des remous économiques à la hausse comme à la baisse. **(Source : EIA/DoE)**

sont soudain devenus intéressants et ont donc été mis en production. Mais il a fallu du temps pour trouver des gisements, et ensuite construire et ouvrir des installations de production de pétrole, qu'il s'agisse de puits, de raffineries ou de pétroliers.

Pendant ce temps, les consommateurs ont réagi à la hausse des prix en économisant. Les constructeurs automobiles ont produit des voitures plus efficientes, les particuliers ont isolé leur maison et les compagnies d'électricité ont arrêté leurs centrales électriques à pétrole et investi dans des installations au charbon ou nucléaires. Les États ont encouragé différentes formes d'économies d'énergie et favorisé le développement d'alternatives énergétiques. Là encore, le processus a pris des années et il s'est traduit par des modifications à long terme du stock mondial de capital.

Les partisans de l'économie de marché ont tendance à penser que ce dernier réagit toujours rapidement, mais sur le marché

mondial du pétrole, il aura fallu près de 10 ans pour que les diverses réactions aboutissent finalement à un rééquilibrage de l'offre et de la demande au niveau de consommation le plus faible en raison du prix très élevé du pétrole. En 1983, la consommation mondiale de pétrole avait chuté de 12 % par rapport au pic qu'elle avait connu en 1979[6]. Mais le capital de production restait trop élevé et l'OPEP a dû à nouveau abaisser sa capacité de pompage à 50 % ou presque de ce qu'elle était. Les cours mondiaux ont lentement baissé, puis ils se sont effondrés en 1985 et ont continué à descendre (en dollars réels) jusqu'à la fin des années 1990.

De la même façon que les prix étaient montés trop haut, ils se sont alors trop effondrés. Et tandis que les raffineries fermaient et que les régions productrices de pétrole étaient frappées par la dépression, on a abandonné peu à peu les économies d'énergies. Les conceptions de véhicules efficients ont été mises aux oubliettes et les investissements dans les sources alternatives se sont taris. Pour finir, ces mécanismes d'ajustement se sont renforcés, réunissant les conditions d'un nouveau déséquilibre et d'une nouvelle hausse des prix ; c'est ce qui s'est traduit par des prix relativement élevés durant les premières années du XXIe siècle.

Ces montagnes russes ont été la conséquence du temps de réaction incompressible du marché pétrolier. Elles ont entraîné à l'échelle internationale de très importants changements dans la répartition de la richesse, créant des dettes et des excédents considérables, des hausses et des baisses extrêmes et des défaillances bancaires, résultats de tentatives d'ajustement entre le capital de production et le capital de consommation du pétrole. Aucune de ces oscillations n'était liée à la quantité de pétrole présent sous terre (qui diminuait de façon régulière) ni aux répercussions sur l'environnement des forages, du transport, du raffinage et de la combustion du pétrole. Le signal émis à travers les cours du marché a essentiellement fourni des informations sur la pénurie ou le surplus relatifs de pétrole disponible.

6. Lester Brown *et al.*, *Vital Signs 2000*, *op. cit.*

De nombreuses raisons expliquent que les signaux du marché pétrolier n'aient pas encore informé utilement le monde sur les limites physiques en passe d'être atteintes. Les autorités publiques des pays producteurs interviennent en effet pour faire monter les prix ; elles sont tentées de mentir au sujet de leurs réserves, c'est-à-dire de les gonfler afin d'être éligibles à des quotas de production plus élevés. De leur côté, les autorités publiques des pays consommateurs s'efforcent d'empêcher les prix de grimper. Elles peuvent pour cela mentir sur leurs réserves et les gonfler elles aussi afin de réduire le pouvoir politique des producteurs indépendants. Quant aux spéculateurs, ils peuvent amplifier la valse des prix. Les quantités de pétrole en surface prêtes à être utilisées exercent une bien plus grande influence sur les prix que celles qui, sous nos pieds, constituent les ressources futures. Le marché est sourd à toute idée de long terme et n'a que faire des sources et des exutoires ultimes jusqu'à ce qu'ils soient quasiment épuisés et qu'il soit trop tard pour appliquer des solutions satisfaisantes.

Les signaux économiques et les réponses technologiques peuvent ainsi susciter de violentes réactions, comme le montre l'évolution du prix du pétrole, mais ils sont tellement déconnectés du système terrestre qui leur permettrait de donner à tous les pays des informations utiles sur les limites physiques.

Pour finir, nous aimerions revenir sur les *objectifs* au service desquels œuvrent la technologie et les marchés. Ceux-ci ne sont que des outils. Ils ne sont pas dotés de plus de sagesse, de prévoyance, de modération ou de compassion intrinsèques que les bureaucrates qui les ont créés. Le résultat qu'ils induisent dans le monde dépend des personnes qui s'en servent et des fins auxquelles elles s'en servent. S'ils sont utilisés pour des objectifs insignifiants, pour créer des inégalités ou pour perpétrer la violence, c'est ce qu'ils produiront. Si on attend d'eux qu'ils rendent possible l'impossible, comme l'expansion physique constante sur une planète finie, leur usage se soldera par un échec. En revanche, si on fait appel à eux pour servir des buts réalistes et soutenables, ils contribueront à l'avènement d'une société dura-

ble. Nous expliquerons dans le prochain chapitre comment cela peut se produire.

La technologie et les marchés peuvent apporter une aide précieuse s'ils sont régulés et exploités en vue du bien commun à long terme. Lorsque la planète a décidé de se passer des CFC, la technologie a rendu cette évolution possible sur plusieurs décennies. Nous ne pensons pas qu'il soit envisageable de créer un monde de sobriété, d'équité et de durabilité sans la créativité technique, l'esprit d'entreprise et un marché relativement libre. Mais nous ne pensons pas non plus que cela soit suffisant. Il faudra que l'humain exploite certaines de ses autres aptitudes pour créer un monde soutenable, car en l'absence de celles-ci, le progrès technologique et les marchés peuvent se liguer pour contrer la durabilité et accélérer la disparition de ressources importantes. C'est exactement ce qui s'est produit avec les pêcheries de la planète.

La technologie, les marchés et la destruction des pêcheries

> *Je me souviens que j'attrapais 2 300 kg de poisson avec 8 filets. Aujourd'hui, il faut jusqu'à 80 filets. À l'époque, une morue au printemps pesait en moyenne entre 11 et 18 kg. Aujourd'hui, elles ne pèsent plus que 2 à 4 kg.*
>
> – Un pêcheur de la zone de pêche de Georges Bank, 1988

> *Vous voulez des informations sur la morue ? Je vais vous dire : il n'y en a plus.*
>
> – Dave Molloy, pêcheur canadien, 1997

L'histoire récente de la pêche dans le monde illustre bien à quel point la technologie et les marchés réagissent parfois de façon inappropriée lorsqu'on approche des limites. Dans le cas de la pêche mondiale, on s'est retrouvé en présence du cocktail « normal », composé de déni des limites, d'efforts croissants pour conserver le volume de capture traditionnel, d'expulsion des pêcheurs étrangers, de subventions attribuées aux pêcheurs locaux

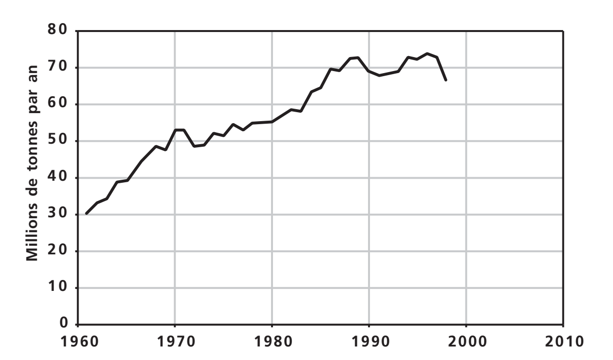
et, pour finir, de mise en place hésitante d'une réglementation. Dans certains cas, comme dans celui de la pêche à la morue sur la côte est du Canada, à laquelle font référence les citations ci-dessus, l'intervention de la société s'est produite trop tard pour préserver les ressources.

La réglementation de la pêche concerne petit à petit la majeure partie des grandes pêcheries. L'ère des « océans en libre accès » touche certainement à sa fin. Les limites ne font plus de doutes, et constituent aujourd'hui un aspect essentiel de la pêche dans le monde. Conséquence de la pénurie de ressources et de la réglementation, les captures mondiales de poisson sauvage ont cessé d'augmenter. Dans les années 1990, l'ensemble des captures mondiales de poisson de mer à des fins commerciales avoisinait les 80 millions de tonnes par an[7] (figure 6-7). Nous ne saurons que dans un grand nombre d'années si ce palier est soutenable ou s'il annonce le début d'un effondrement. Vers 1990, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a estimé que les eaux de la planète ne pouvaient pas supporter une pêche commerciale dépassant les 100 millions de tonnes par an de ressources conventionnelles, un chiffre légèrement au-dessus du niveau constaté dans les années 1990.

Rien d'étonnant, dès lors, à ce que l'aquaculture ait connu un rapide essor à la même époque et qu'elle produise aujourd'hui près de 40 millions de tonnes de poisson par an contre 13 en 1990. Un tiers du poisson consommé dans le monde vient à présent de l'aquaculture. N'est-ce pas là une belle réaction de la part du marché et de la technologie ? Cet essor de l'aquaculture n'est-il pas l'illustration de la faculté de la technologie et des marchés à résoudre les problèmes ? Pas vraiment, et pour trois raisons. La production de poisson représentait auparavant une source de nourriture ; elle est en train de devenir un exutoire. Le poisson et les autres espèces aquatiques nourrissaient auparavant les populations pauvres ; ils nourrissent aujourd'hui de plus en plus les

7. *Ibid.*

FIGURE 6-7 – Captures mondiales de poisson sauvage



L'ensemble des captures mondiales de poisson sauvage a augmenté de façon spectaculaire entre 1960 et 1990. Mais cette hausse a cessé durant les 10 dernières années du XXe siècle. **(Source : FAO)**

riches. Les bancs de poissons sont neutres pour l'environnement ; les exploitations piscicoles sont catastrophiques.

Tout d'abord, les lieux de pêche en haute mer sont une véritable source de nourriture pour l'humanité, car ils permettent la transformation de simples plantes en une chair délicieuse. Les élevages de poissons, eux, ne représentent par une source nette de nourriture ; ils ne font que convertir une forme de nourriture en une autre avec les inévitables pertes qui accompagnent chaque stade du processus. Les poissons d'élevage sont généralement nourris avec des céréales ou des farines de poisson. Deuxièmement, le poisson était auparavant une importante source de nourriture pour les populations pauvres, une source locale peu ou pas coûteuse. Les communautés pouvaient se rassembler et, au moyen d'outils simples, se procurer la nourriture dont elles avaient besoin. Les élevages de poissons, en revanche, sont destinés aux marchés où les profits sont les plus élevés. Le saumon et les crevettes d'élevage finissent dans les assiettes des populations riches et ne nourrissent plus les pauvres. Et la situation est rendue plus problématique encore par la destruction des ressources halieutiques côtières. De nombreux stocks locaux ont en effet

disparu et les consommateurs situés loin de ces réserves font grimper les prix des stocks restants. Résultat : les pauvres ont moins de poisson à leur disposition. Enfin, l'élevage du poisson, des crevettes et d'autres espèces aquatiques produit d'importants dégâts sur l'environnement. À cause de cette activité, certaines espèces cultivées s'échappent dans la nature, les mers recueillent des déchets alimentaires et des antibiotiques, les virus se répandent et les zones humides côtières sont détruites. Et ces effets dévastateurs ne sont pas le fruit du hasard. Ils résultent du fonctionnement du marché : ce ne sont que des « externalités » qui n'affectent en rien les prix et les profits des principaux marchés halieutiques.

En 2002, selon la FAO, environ 75 % des pêcheries océaniques mondiales étaient en pleine exploitation ou en surexploitation[8]. Dans 9 des 19 zones de pêche mondiales, les captures dépassaient le seuil le plus bas des rendements considérés comme soutenables.

Plusieurs événements d'envergure illustrent le stress considérable qui pèse sur les pêches de la planète. En 1992, le gouvernement canadien a fermé toutes ses zones de pêche situées sur la côte est, y compris les pêcheries de morue. Elles étaient toujours fermées en 2003, car les stocks n'étaient pas suffisamment reconstitués. En 1994, la pêche au saumon au large de la côte ouest des États-Unis a été drastiquement limité[9]. En 2002, quatre pays bordant la mer Caspienne sont tombés d'accord pour mettre en place un dispositif de protection de l'esturgeon, qui donne le célèbre caviar, après que les captures annuelles sont passées de 22 000 tonnes dans les années 1970 à seulement 1 000 tonnes à la fin des années 1990[10]. Les populations de thons rouges, qui vivent normalement 30 ans et atteignent les 700 kg, ont baissé de 94 % entre 1970 et 1990. Quant au nombre total de captures dans les

8. FAO, « La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2002 », <www.fao.org/docrep/005/y7300f/y7300f00.htm>.

9. Lester Brown, *Éco-Économie*, *op. cit.*

10. Fiches d'informations du WWF « Endangered Seas Campaign », 2003.

eaux norvégiennes, il n'est maintenu que parce que les poissons les plus prisés, qui ont disparu, sont remplacés par des espèces moins courues.

D'un autre côté, un moratoire de 10 ans sur la pêche a permis aux stocks de hareng et de morue de se reconstituer dans les eaux norvégiennes, prouvant qu'il est possible d'inverser une tendance négative par des politiques publiques. Cela s'avère cependant plus difficile pour l'Union européenne qui essaie de réduire la capacité de sa flotte de pêche. Celle-ci déserte de plus en plus les eaux européennes pour celles de pays en développement relativement pauvres, privant les populations locales d'emplois précieux et d'une source de protéines. En résumé, cela fait peu de doute : les pêches mondiales se heurtent violemment aux limites planétaires.

Et tandis que l'industrie mondiale de la pêche profitait de marchés assez libres et dynamiques jusqu'en 1990, elle jouissait en plus d'avancées technologiques considérables. Les processus de réfrigération permettent en effet aux bateaux de rester à proximité de zones de pêche éloignées plutôt que de devoir rentrer quotidiennement avec la prise d'une seule journée. La localisation par radar, par sonar ou par satellite amène la flotte jusqu'aux stocks de poisson avec une efficience accrue. Les filets dérivants de 45 km de long permettent de pratiquer une pêche économique et à grande échelle, même par grands fonds. La conséquence de tout cela est que les prises d'un nombre croissant de pêcheries dépassent les limites soutenables. Au lieu de protéger les stocks ou de permettre de les reconstituer, la technologie employée a donc au contraire pour but d'attraper jusqu'au dernier poisson (figure 6-8).

Bien que la plupart des individus comprennent de façon intuitive que tout cela mène à une surexploitation des stocks de poisson, le marché n'envoie pas de signal correctif pour empêcher les différents acteurs de surexploiter une ressource aussi répandue que des poissons de mer. Il fait même l'inverse puisqu'il s'empresse de récompenser ceux qui arrivent les premiers et réalisent

FIGURE 6-8 – Baisse de la population de thons rouges

Nombre d'individus âgés de 8 ans et plus
200 000
100 000
0
1970
1980
1990
2000

La population de thons rouges sexuellement matures (plus de 8 ans) dans l'Atlantique ouest a baissé de 80 % durant les 30 dernières années. Mais comme leur chair est très prisée, la pêche continue. **(Source : ICCAT)**

le plus de captures[11]. Si le marché avertit d'une pénurie en augmentant le prix du poisson, les plus riches seront prêts à payer ce tarif. À Tokyo, au début des années 1990, le thon rouge avait ainsi atteint 100 dollars la livre sur le marché des sushis[12]. Et à Stockholm, en 2002, la morue, le principal aliment des populations pauvres autrefois, a atteint la somme astronomique de 80 dollars la livre[13]. Ces cours élevés encouragent malheureusement les producteurs à redoubler d'efforts, alors que les ressources halieutiques continuent à diminuer. Mais ces cours élevés ralentissent la hausse de la demande et le poisson n'est plus acheté que par ceux qui peuvent se le permettre, et qui ne sont pas, hélas, ceux qui en ont le plus besoin.

Les acteurs du marché qui s'acharnent à exterminer les ressources sont très lucides. Ce qu'ils font est parfaitement sensé, vu les avantages et les inconvénients inhérents à leur position au sein

11. On trouvera une analyse classique de ce phénomène dans Garrett Hardin, « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, nº 3859, 13 décembre 1968.

12. Audubon (septembre-octobre 1991).

13. *Dagens Næringsliv* (journal économique norvégien), Oslo, 9 décembre 2002.

du système. Ce ne sont pas les individus qui sont fautifs, c'est le *système*. Car, lorsqu'un marché non réglementé gère une ressource commune dont le rythme de régénération est lent, cela conduit inévitablement au dépassement et à la destruction des biens communs.

> *On s'imagine que l'industrie baleinière se soucie de la disparition des baleines, mais il faut en fait la considérer comme une vaste entreprise où l'argent coule à flots et qui tente de faire le maximum de profits. Si elle peut faire 15 % de profits en exterminant toutes les baleines en 10 ans, alors qu'elle n'en ferait que 10 % en pratiquant une exploitation soutenable, elle choisira d'exterminer ces animaux en 10 ans. Après quoi elle investira dans l'extermination d'une autre ressource*[14].

Seules certaines limitations imposées par les politiques peuvent permettre de protéger une ressource, mais elles ne sont pas faciles à mettre en place. Les réglementations ne marchent pas non plus à chaque fois. De récentes études montrent également qu'il y a souvent surexploitation lorsque la ressource renouvelable est entièrement détenue par des intérêts privés et qu'il ne peut donc être question de « tragédie des biens communs »[15]. Le dépassement est tout simplement lié au fait que les informations sur la ressource – estimation du stock, volume des captures, taux de croissance – ne sont pas sûres, arrivent brouillées et ne sont pas adaptées aux règles de décision classiques en matière de gestion. Cela se traduit le plus souvent par un surinvestissement dans le capital d'exploitation et par une surexploitation de la ressource.

Les marchés et la technologie ont conduit la pêche maritime mondiale au bord du gouffre. Ce n'est donc pas en continuant comme cela que l'on va restaurer les ressources halieutiques. On

14. Un journaliste japonais à Paul Ehrlich *in* R. J. Hoage (dir.), *Animal Extinctions : What Everyone Should Know*, Washington, DC, Smithsonian Institution Press, 1985.

15. Erling Moxness, « Not Only the Tragedy of the Commons : Misperceptions of Feedback and Policies for Sustainable Development », *System Dynamics Review*, vol. 16, n° 4, hiver 2000.

constate donc que lorsqu'ils sont utilisés en dehors de toute notion de limites, les marchés et la technologie ne peuvent engendrer que le dépassement. En revanche, moyennant certains freins et certaines institutions régulatrices, ils ont le potentiel pour fournir à l'industrie mondiale de la pêche des ressources abondantes pendant de nombreuses générations.

En résumé

La croissance exponentielle de la population, du capital, de la consommation de ressources et de la pollution est à l'œuvre sur notre planète. Elle est propulsée par les tentatives des humains pour résoudre les problèmes qui les assaillent, depuis le chômage et la pauvreté jusqu'au besoin de statut social, de pouvoir et d'estime de soi.

La croissance exponentielle peut très vite dépasser n'importe quelle limite. Ce faisant, elle se heurte très rapidement à une autre limite.

Étant donné le temps que les limites mettent pour envoyer des signaux, le système économique mondial est susceptible de dépasser son niveau soutenable. De fait : le dépassement est déjà de mise pour un grand nombre de sources et d'exutoires importants de l'économie mondiale.

La technologie et les marchés ne fonctionnent qu'à partir d'informations imparfaites et mettent du temps à réagir. Ils peuvent en cela renforcer la tendance de l'économie à dépasser les limites.

La technologie et les marchés sont le plus souvent au service des segments les plus puissants de la société. Si l'objectif premier est la croissance, ils produiront de la croissance aussi longtemps qu'ils le pourront. Si les objectifs premiers étaient l'équité et la durabilité, ils agiraient dans ce sens.

Une fois que la population et l'économie ont dépassé les limites physiques de la planète, il n'y a que deux moyens de faire marche arrière : par un effondrement involontaire dû à l'escalade

des pénuries et des crises, ou par une réduction contrôlée de l'empreinte écologique, fruit d'une démarche sociétale délibérée.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner ce qui se produit lorsque les améliorations techniques sont associées à des choix sociétaux afin de limiter la croissance.

CHAPITRE 7

Transitions vers un système soutenable

Dans un état stationnaire, nous exigerions moins de ressources de l'environnement, mais plus de notre intellect.

– Herman Daly, 1971

Les humains peuvent réagir de trois façons aux signaux indiquant que l'utilisation des ressources et les émissions de pollution ont dépassé les limites durables. L'une d'elles consiste à nier les signaux, à les travestir ou à les brouiller. Cette réaction peut prendre de nombreuses formes. Certains affirment qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter des limites et que le marché et la technologie sont là pour résoudre tous les problèmes. D'autres disent qu'il ne faut pas tenter de lutter contre le dépassement tant qu'un grand nombre d'études supplémentaire n'ont pas été menées. Certains, enfin, essaient de faire peser le coût du dépassement sur des individus éloignés dans l'espace ou dans le temps. Voici ce qu'ils peuvent alors faire :

- Construire des cheminées plus hautes pour que la pollution s'envole plus loin où d'autres vont la respirer.
- Expédier les produits chimiques toxiques et les déchets nucléaires dans de lointaines décharges.
- Surexploiter les ressources halieutiques ou forestières en invoquant la nécessité de préserver les emplois ou de rembourser

des dettes, ce qui revient à épuiser des stocks naturels dont les emplois et le remboursement des dettes, précisément, dépendent.

- Subventionner les industries extractives qui périclitent du fait de la raréfaction des matières premières.
- Chercher de nouvelles ressources tout en utilisant celles qui ont été découvertes de manière non efficiente.
- Compenser la baisse de la fertilité des sols en utilisant toujours plus d'engrais.
- Maintenir des prix bas au moyen de décrets ou de subventions pour qu'ils n'augmentent pas à la suite d'une pénurie de ressources.
- Avoir recours ou menacer d'avoir recours à la force militaire pour garantir l'utilisation de ressources qui sont trop chères à l'achat.

Loin de résoudre les problèmes dus à une empreinte écologique trop élevée, ces mesures ne feront en fait que les aggraver.

La deuxième façon de réagir consiste à atténuer la pression exercée par les limites au moyen de procédés techniques ou économiques ; il est ainsi possible de :

- Réduire la quantité de pollution générée par kilomètre parcouru ou par kilowatt d'électricité produite.
- Utiliser les ressources de manière plus efficiente, les recycler ou remplacer les ressources non renouvelables par des ressources renouvelables.
- Remplacer les fonctions que la nature assurait, comme le traitement des eaux usées, le contrôle des inondations ou la fertilisation des sols, par de l'énergie, du capital humain ou du travail.

Ces mesures s'imposent de toute urgence. Nombre d'entre elles permettront une meilleure éco-efficience et atténueront temporairement les pressions, nous faisant gagner un temps précieux. Mais elles n'élimineront pas pour autant les causes de

ces pressions. Ainsi, si on réduit la pollution par kilomètre parcouru mais que les individus conduisent davantage, ou qu'on accroît la capacité de traitement des eaux usées mais que ces dernières augmentent de volume, on aura remis les problèmes à plus tard, mais on ne les aura pas résolus.

La troisième façon de réagir suppose de s'attaquer aux causes sous-jacentes, de prendre du recul et d'admettre que le système socioéconomique des humains, tel qu'il est actuellement structuré, n'est pas gérable, a dépassé ses limites et se dirige vers un effondrement. Il faut donc chercher à *changer la structure du système.*

L'expression *changer la structure* est souvent connotée de façon négative. Elle a été employée par certains révolutionnaires pour signifier qu'ils voulaient renverser les personnes au pouvoir, y compris, parfois, en utilisant les armes. Certains s'imaginent que changer la structure signifie changer les structures *physiques*, c'est-à-dire faire tomber les anciens bâtiments et en construire de nouveaux à la place. Ou bien on peut imaginer que cela signifie changer la structure du pouvoir, la hiérarchie, le processus d'exécution des ordres. Dans ces conditions, changer la structure semble difficile, dangereux et risqué pour ceux qui détiennent le pouvoir économique ou politique.

Dans le langage des systèmes, cependant, *changer la structure* n'a rien à voir avec le fait de renverser des personnes au pouvoir, de tout démolir ou de mettre à bas la bureaucratie. Car accomplir ces actions sans opérer de *véritable* changement dans la structure n'apporterait rien : des personnes différentes consacreraient autant voire davantage de temps et d'argent à poursuivre les mêmes objectifs dans de nouveaux bâtiments et au sein de nouvelles organisations, pour produire les mêmes résultats qu'avant.

En analyse des systèmes, changer une structure signifie changer la *structure en boucle de rétroaction, les liens relatifs à l'information* dans un système : le contenu et l'échéance des données avec lesquelles les acteurs du système doivent travailler et les idées, les objectifs, les stimulations, les coûts et les rétroactions qui motivent ou au contraire entravent un comportement. On

peut prendre les mêmes personnes, les mêmes organisations et les mêmes structures physiques et obtenir d'elles un comportement totalement différent si les acteurs du système y voient un intérêt et si on leur laisse la liberté de changer, voire qu'on les y incite. Un système doté d'une nouvelle structure de l'information peut finir par changer lui aussi ses propres structures sociales et physiques. Il peut développer de nouvelles lois, de nouvelles organisations, de nouvelles technologies, enrichir les individus de nouvelles compétences, concevoir de nouvelles machines ou de nouveaux bâtiments. Pareille transformation n'a pas besoin d'être dirigée de façon centralisée ; elle peut être non planifiée, naturelle, évolutive, dynamisante et joyeuse.

De nouvelles structures engendrent automatiquement des changements dans tous les domaines. Nul besoin de sacrifice ni de coercition, mis à part, peut-être, pour empêcher ceux qui y ont intérêt de faire fi des informations importantes, de les déformer ou d'en limiter le flux. Les humains ont assisté à plusieurs transformations structurelles au cours de leur histoire. Les révolutions agricole et industrielle en sont les meilleures illustrations. Toutes deux ont eu pour point de départ de nouvelles *idées* sur la façon de planter les cultures, d'exploiter l'énergie et d'organiser le travail. Et comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, c'est même la réussite de ces transformations passées qui a amené la planète à ressentir la nécessité d'en accomplir une nouvelle que nous appellerons la révolution de la durabilité.

World3 ne peut pas représenter la dynamique évolutive d'un système en pleine restructuration. Mais il peut servir à tester certains des changements les plus élémentaires opérés par une société qui décide de faire marche arrière par rapport au dépassement et de poursuivre des objectifs plus satisfaisants et plus durables que la perpétuelle croissance matérielle.

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes servis de World3 pour voir ce qui se produit si la planète procède à des changements dans ses valeurs *numériques* et non dans sa structure. Nous avons intégré des limites plus élevées, des temps de

réaction plus courts, des interventions plus rapides et plus soutenues de la part de la technique et des boucles d'érosion moins actives. Si, au lieu de cela, nous étions partis de l'hypothèse que ces caractéristiques structurelles n'existent pas – pas de limite, pas de temps de réaction, pas de boucle d'érosion – nous aurions totalement éliminé le dépassement et l'effondrement (à l'instar de ce que nous avons fait dans le Scénario 0, « Infinité en entrée, infinité en sortie »). Mais les limites, les temps de réaction et l'érosion sont des propriétés physiques de la planète. Les êtres humains peuvent les atténuer, les améliorer, les manipuler avec diverses technologies et s'en accommoder en modifiant leur mode de vie, mais ils ne peuvent pas les faire disparaître entièrement.

Les causes structurelles du dépassement sur lesquelles les humains peuvent le plus agir sont celles que nous n'avons pas modifiées dans le chapitre 6, à savoir celles qui actionnent les boucles de rétroaction positives responsables de la croissance exponentielle de la population et du capital physique. Il s'agit des normes, des objectifs, des attentes, des pressions, des incitations et des coûts qui poussent les individus à faire plus d'enfants que ce que le seuil de renouvellement exige. Il s'agit des croyances et des pratiques solidement ancrées en nous, qui nous entraînent à gaspiller davantage les ressources naturelles que l'argent, distribuer les revenus et la richesse de façon non équitable, à nous considérer avant tout comme des consommateurs et des producteurs, à associer statut social et confort matériel ou financier, et à définir les objectifs en fonction de ce qui nous permettra d'obtenir plus et non de donner plus ou d'obtenir ce qui est suffisant.

Dans ce chapitre, nous allons modifier les boucles de rétroaction positives qui entraînent une croissance exponentielle dans le système mondial. Nous allons étudier comment sortir en douceur de l'état de dépassement. Pour cela, nous allons adopter une nouvelle perspective centrée non pas sur les technologies qui permettent de changer les limites, mais sur les objectifs et les aspirations qui président à la croissance. Nous commencerons en

ne modifiant *que* les boucles de rétroaction positives, c'est-à-dire sans intégrer les évolutions techniques que nous avons testées dans le chapitre précédent, puis nous associerons les deux types de changements.

Des limites délibérées à la croissance

Supposons qu'à partir de 2002, chaque couple dans le monde soit conscient de ce qu'implique la poursuite de l'accroissement démographique pour leurs propres enfants comme pour ceux des autres. Supposons que la société garantisse à tous les individus qu'une fois devenus vieux, ils seront acceptés, respectés, jouiront d'une sécurité matérielle et recevront une certaine attention et ce, même s'ils ont très peu d'enfants. Supposons également que ce soit un objectif social commun d'apporter à ses enfants une alimentation appropriée, un toit, des soins de santé et une instruction. Supposons enfin qu'en conséquence, tous les couples décident de se limiter à deux enfants (en moyenne) et qu'ils aient à leur disposition des moyens de contrôle des naissances qui leur permettent d'atteindre leur objectif.

Pareil changement ferait naître une perception différente des coûts et des avantages liés à la procréation, augmenterait les perspectives d'avenir et nous inciterait à nous préoccuper davantage du bien-être des autres. Il nous conférerait de nouveaux pouvoirs, de nouvelles responsabilités et élargirait le champ des possibles. Il s'agirait d'une restructuration du système équivalente – bien que différente – à celle qui, dans les pays industrialisés, a déjà ramené le taux de natalité au niveau du seuil de renouvellement des générations voire en dessous. Pareil changement n'est en aucun cas inconcevable ; il part de l'hypothèse que tous les habitants de la planète adoptent les mêmes choix en matière de procréation que ceux qu'ont faits, il y a longtemps déjà, environ 1 milliard d'individus dans les pays les plus développés.

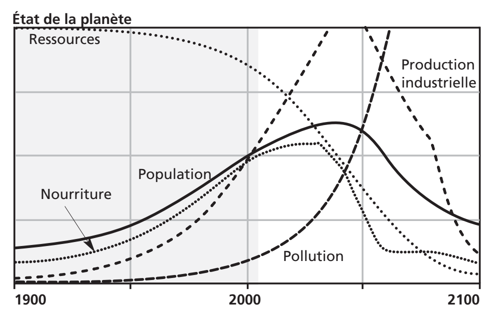
Le Scénario 7, figure 7-1, nous montre ce qui se produit si ce seul changement intervient dans World3.

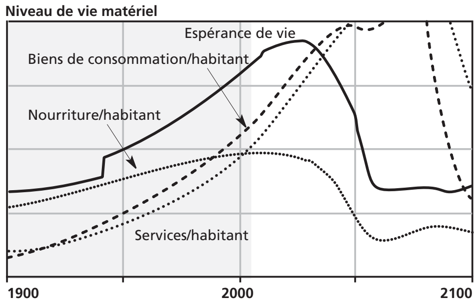
Pour produire ce scénario, nous avons fixé à deux enfants la taille moyenne de la famille désirée par la population modélisée et à 100 % le taux de réussite des méthodes de régulation des naissances à partir de 2002. Résultat : la population augmente lentement, mais suivant la dynamique de la structure par âges, la population atteint un pic à 7,5 milliards d'individus en 2040. Ce pic de population est inférieur d'un demi-milliard à celui du Scénario 2. Une politique prônant deux enfants et efficace à l'échelle planétaire, introduite en 2002, réduit donc le pic démographique de moins de 10 %. L'explication tient au fait que, même en l'absence d'une telle politique, la population modélisée du début du XXIe siècle s'approche à grands pas d'un niveau de vie qui lui fait de toute façon souhaiter une famille réduite et grâce auquel elle a accès à des moyens de contrôle des naissances proches des 100 % d'efficience.

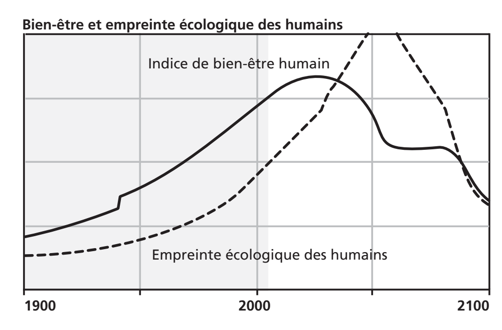
Ce pic démographique moins élevé a des effets positifs, car, comme la population croît moins vite, la quantité de biens de consommation et de nourriture par habitant ainsi que l'espérance de vie sont tous trois fois plus élevés que dans le Scénario 2. Lors du pic, en 2040, la production de biens de consommation par habitant dépasse de 10 % celle du Scénario 2, tout comme, à peu de chose près, l'espérance de vie, et l'approvisionnement en nourriture par habitant a augmenté de 20 %. C'est dû au fait qu'on a moins besoin d'investir pour répondre à la demande de consommation et de services d'une population plus restreinte, si bien qu'on consacre davantage d'investissements à la croissance du capital industriel. Ce dernier augmente donc plus et plus vite que dans le Scénario 2. En 2040, la production industrielle par habitant a doublé par rapport à l'année 2000. La population est nettement plus riche qu'au début du siècle et les années comprises entre 2010 et 2030 peuvent être qualifiées d' « âge d'or », le bien-être des humains étant relativement élevé pour une population nombreuse.

Mais la production industrielle atteint un pic en 2040, puis baisse au même rythme à peu près que dans le Scénario 2 et

FIGURE 7-1 – Scénario 7 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population







Ce scénario suppose qu'à partir de 2002, tous les couples décident de limiter leur famille à deux enfants et qu'ils aient accès à des moyens de contrôle des naissances efficaces. Du fait de la dynamique de la structure par âges, la population continue à augmenter pendant une génération. Mais l'accroissement démographique plus lent permet à la production industrielle d'augmenter plus vite jusqu'à ce qu'elle soit stoppée par le coût du traitement d'une pollution croissante, comme dans le Scénario 2.

rigoureusement pour les mêmes raisons. Les usines, plus nombreuses, émettent plus de pollution, ce qui se répercute de façon négative sur la production agricole. Il faut donc consacrer du capital à ce secteur pour maintenir la production de nourriture. Par la suite, après 2050, la pollution est telle qu'elle a un impact négatif sur l'espérance de vie. En résumé, ce scénario est celui d'une « crise de la pollution », car cette dernière, par son niveau élevé, empoisonne la terre, provoquant une pénurie de denrées alimentaires destinées à la population.

Ainsi, avec les limites et les technologies supposées dans le Scénario 7 et en l'absence de tout frein aux aspirations matérielles, ce monde ne peut même pas tolérer 7,5 milliards d'individus. On ne peut donc couper à l'effondrement si on ne stabilise que la population mondiale. La poursuite de la croissance du capital est tout aussi non soutenable que celle de la croissance démographique. Si elles ne sont pas contrôlées, chacune d'elle a pour conséquence une empreinte écologique qui dépasse la capacité de charge du globe.

Mais que se passe-t-il si, dans le monde, les individus décident de réduire non seulement leur nombre d'enfants mais aussi leur mode de vie matériel ? S'ils visent un niveau de vie convenable mais pas excessif ? Ce changement structurel hypothétique est moins flagrant dans le monde actuel que le désir d'avoir moins d'enfants, mais il est loin d'être absent[1]. C'est un changement prôné par toutes les religions ou presque ; il intervient non dans le monde physique ou politique, mais dans l'esprit et le cœur des populations, dans leurs objectifs et dans leur approche du sens de la vie. Un tel changement suppose que les individus se définissent un statut, retirent du plaisir et se fixent des défis en fonction d'objectifs autres que ceux d'une augmentation perpétuelle de la production ou d'une accumulation sans fin de richesses matérielles.

---

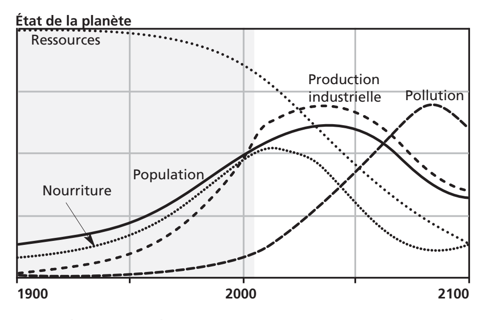
1. Voir Duane Elgin, *Voluntary Simplicity*, édition révisée, New York, Quill, 1998, et Joe Dominguez et Vicki Robin, *Votre vie ou votre argent*, Montréal, Éditions Logiques, 2001.

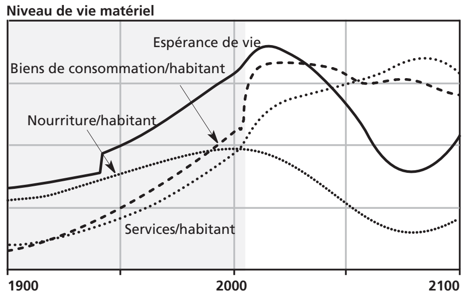
Le Scénario 8, figure 7-2, présente un monde simulé où, là encore, les couples souhaitent se limiter à deux enfants et où les moyens de contrôle des naissances fonctionnent parfaitement, mais où intervient cette fois une définition de ce qui est *suffisant*. Ce monde a décidé de se fixer comme objectif une production industrielle par habitant d'environ 10 % supérieure *pour tout le monde* à la moyenne mondiale de 2000. Cela se traduit concrètement par une avancée considérable pour les populations pauvres et par un changement des modes de consommation pour les populations riches. Ce monde modélisé est en outre censé atteindre cet objectif en réduisant ses investissements puisqu'il choisit de concevoir ses équipements de façon à ce que leur durée de vie soit rallongée de 25 %. La durée de vie moyenne du capital industriel est censée passer de 14 à 18 ans, celle du capital tertiaire de 20 à 25 ans, et celle des intrants agricoles de 2 à 2,5 ans.

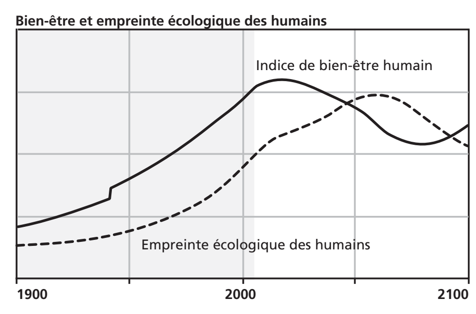
Comme on peut le constater sur la modélisation, ces changements entraînent une hausse considérable des biens et des services par habitant durant les 10 premières années qui suivent 2002. Ils augmentent même plus et plus vite que dans le scénario précédent où la croissance industrielle n'était pas limitée. Cela est dû au fait qu'une moindre quantité de production industrielle doit être investie dans la croissance du capital et dans la compensation de la dépréciation, puisque le capital a une durée de vie plus longue. Une part plus importante de la production est donc immédiatement disponible pour la consommation. En conséquence, entre 2010 et 2040, cette société hypothétique assure *à chacun* un niveau de confort matériel parfaitement approprié, mais sobre.

Mais cette économie n'est pas véritablement stabilisée. Elle se caractérise par une empreinte écologique au-dessus du niveau soutenable et elle est contrainte à un long déclin après 2040. Le monde, dans ce scénario, parvient à subvenir aux besoins de plus de 7 milliards d'individus en leur garantissant un niveau de vie convenable pendant presque 30 ans, de 2010 à 2040. Les biens de consommation et les services par habitant augmentent

FIGURE 7-2 – Scénario 8 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population et sa production industrielle par habitant







Si la société modélisée se met à la fois à souhaiter une famille de deux enfants et à établir un objectif fixe en matière de production industrielle par habitant, elle peut prolonger quelque peu l' « âge d'or » caractérisé par un bien-être humain assez élevé par rapport au Scénario 7 : il dure ainsi jusqu'en 2040. Mais la pollution fait subir un stress croissant aux ressources agricoles. La production alimentaire par habitant baisse et avec elle, au bout du compte, l'espérance de vie et la population.

de quelque 50 % par rapport à leur niveau de 2000. La production alimentaire totale atteint cependant un pic dès 2010 et baisse régulièrement ensuite, sous l'effet du stress lié à la pollution, qui augmente encore pendant plusieurs dizaines d'années. De plus en plus d'investissements sont consacrés à l'agriculture afin de ralentir la baisse de la production alimentaire. Pendant un certain temps, le capital est disponible, car il n'est pas consacré à l'accroissement de la croissance industrielle. Mais petit à petit, la pression se fait trop forte pour le secteur industriel et le déclin s'amorce.

La société simulée dans ce scénario parvient à atteindre et à conserver le niveau de vie qu'elle souhaite pendant 30 ans ou presque, période pendant laquelle, cependant, l'environnement et les sols se détériorent progressivement. Une consommation limitée, une progéniture limitée et une certaine discipline sociale ne sont donc pas garantes à elles seules de la durabilité lorsqu'elles entrent en action trop tard, c'est-à-dire après que le système a dépassé ses limites. Pour demeurer soutenable, le monde du Scénario 8 ne peut pas se contenter de contrôler sa croissance : il doit abaisser son empreinte écologique en dessous de la capacité de charge de l'environnement et il doit accentuer sa restructuration sociale grâce à une exploitation concertée et appropriée du progrès technologique.

Des limites à la croissance + des technologies améliorées

Dans le Scénario 9, figure 7-3, comme dans le Scénario 8, le monde modélisé décide d'avoir en moyenne deux enfants à partir de 2002, dispose de moyens de contraception parfaitement efficaces et limite la production matérielle. Mais, toujours à partir de 2002, il développe, finance et utilise les mêmes technologies que celles que nous avons testées dans le Scénario 6, chapitre 6. Elles permettent d'améliorer l'efficience de l'utilisation des ressources, de réduire les émissions de pollution par unité de production industrielle, de contrôler l'érosion des terres et d'augmenter le

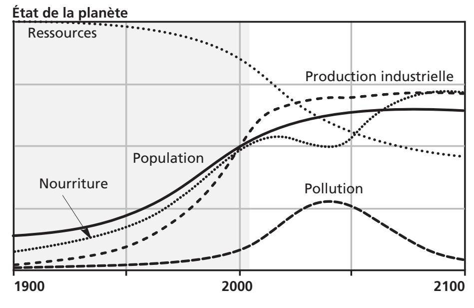
rendement agricole jusqu'à ce que la quantité de nourriture par habitant éteigne le niveau souhaité.

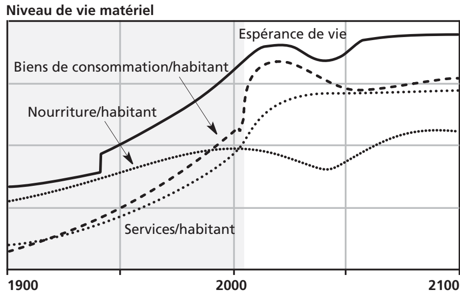
Nous partons du principe, dans le Scénario 9 comme dans le 6, que ces technologies ne sont efficaces qu'après une période de développement de 20 ans et qu'elles ont un coût. Dans le Scénario 6, il n'y avait pas assez de capital pour les financer et les mettre en œuvre tout en gérant les différentes crises auxquelles la société devait faire face à cause de sa croissance rapide. Dans la société plus mesurée du Scénario 9, la population croît plus lentement et il n'est pas nécessaire de consacrer du capital à la poursuite de la croissance ni à la résolution de problèmes survenant en cascade, si bien que les nouvelles technologies peuvent recevoir un soutien plein et entier. Mises en œuvre tout au long du siècle, elles réduisent de 80 % l'utilisation de ressources non renouvelables par unité de production industrielle et de 90 % la pollution générée par unité de production. Et comme la production industrielle est maîtrisée, ces gains ne sont pas consacrés à l'augmentation de la croissance et profitent donc entièrement à la baisse de l'empreinte écologique.

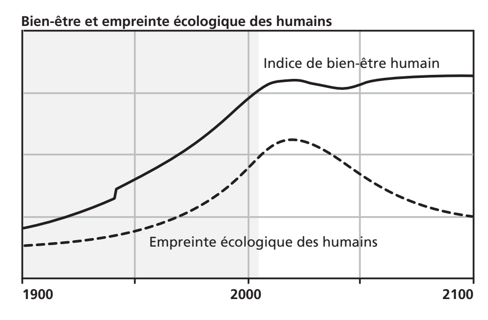
L'augmentation régulière du rendement agricole marque une légère pause durant la première moitié du XXIe siècle, car la pollution s'accentue (un effet avec retardement des émissions rejetées à la fin du siècle précédent, qui se manifeste peut-être dans le « monde réel » par le début du réchauffement climatique). Mais à partir de 2040, la pollution baisse à nouveau grâce à des technologies plus efficaces. Le rendement agricole retrouve alors son niveau d'avant et s'améliore lentement tout au long du reste du siècle.

Dans le Scénario 9, la population se stabilise en dessous des 8 milliards d'individus, ces derniers conservant le niveau de vie matériel qui leur convient pendant tout le siècle. L'espérance de vie est élevée, même si elle baisse légèrement au moment où la production de nourriture faiblit. Les services par habitant augmentent de 50 % par rapport à leur niveau de 2000. À la fin du XXIe siècle, il y a assez de nourriture pour tous. La pollution

FIGURE 7-3 – Scénario 9 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population et sa production industrielle par habitant, et ajoute des technologies relatives à la pollution, aux ressources et à l'agriculture







Dans ce scénario comme dans le précédent, la population et la production industrielle sont limitées, mais on ajoute des technologies destinées à lutter contre la pollution, à préserver les ressources, à augmenter le rendement agricole et à protéger les terres. La société qui en résulte est soutenable : près de 8 milliards d'individus connaissent en effet un niveau de bien-être élevé et une empreinte écologique en constante baisse.

connaît un pic, mais diminue avant d'avoir causé des dégâts irréversibles. Quant aux ressources non renouvelables, elles baissent si lentement que 50 % du stock de départ sont encore présents lors de l'année de simulation 2100.

La société mondiale du Scénario 9 parvient à entamer la réduction de sa pression totale sur l'environnement avant 2020 ; dès lors, l'empreinte écologique de l'humanité ne fait plus que baisser. Le taux d'extraction des ressources non renouvelables chute après 2010. L'érosion des sols est réduite juste après 2002. La production de polluants persistants connaît un pic 10 ans plus tard. Le système redescend en deçà de ses limites, évite un effondrement non contrôlé, maintient son niveau de vie et se tient très proche du point d'équilibre. Le Scénario 9 est l'illustration de la durabilité ; le système mondial est parvenu à un équilibre.

Le terme d'*équilibre*, en langage des systèmes, signifie que les boucles positives et négatives se compensent et que les principaux stocks du système – la population, le capital, la terre, la fertilité des sols, les ressources non renouvelables et la pollution – se maintiennent à un niveau assez constant. Cela ne veut *pas* nécessairement dire que la population ou l'économie soient statiques ou stagnent. Elles ont un volume total à peu près constant, un peu à la manière d'un fleuve dont le volume reste identique même si de l'eau s'écoule en permanence. Dans une « société d'équilibre » comme celle du Scénario 9, certains individus naissent tandis que d'autres s'éteignent et on construit des usines, des routes, des machines et des bâtisses nouvelles tandis que les plus vieilles sont désaffectées ou recyclées. Avec l'amélioration des technologies, le flux de production de matière par habitant pourrait changer de forme, avoir un contenu plus diversifié et gagner en qualité.

De même qu'un fleuve connaît des hausses et des baisses par rapport à son débit moyen, une société d'équilibre peut varier, soit par choix, soit parce que des occasions ou des catastrophes imprévues surviennent. De même qu'un fleuve peut se purifier et subvenir aux besoins de communautés aquatiques plus riches et plus diverses une fois que son taux de pollution a baissé, une

société peut, elle aussi, se débarrasser de sa pollution, acquérir de nouvelles connaissances, rendre ses processus de production plus efficients, opter pour d'autres technologies, améliorer ses techniques de gestion, mettre en place une distribution plus équitable, apprendre et évoluer. Nous pensons pour notre part qu'une société est plus susceptible d'y parvenir lorsque la croissance pèse moins lourd et lorsque cette société évolue assez lentement pour avoir le temps de comprendre les conséquences de ses actes, d'y réfléchir et de faire les bons choix.

La société durable présentée dans le Scénario 9 est selon nous réalisable étant donné nos connaissances sur les systèmes planétaires. Elle se compose de près de 8 milliards d'individus et dispose d'assez de nourriture, de produits de consommation et de services pour que chacun d'eux vive dans le confort. Cette société fait des efforts considérables et utilise des technologies en constante amélioration afin de protéger la terre et les sols, réduire la pollution et utiliser les ressources non renouvelables avec le maximum d'efficience. Et comme sa croissance physique ralentit pour finalement s'arrêter et que ses technologies sont suffisamment rapides pour ramener l'empreinte écologique à un niveau soutenable, cette société a le *temps*, le *capital* et la *capacité* nécessaires pour résoudre ses autres problèmes.

Ce scénario renvoie l'image d'un monde non seulement possible, mais aussi souhaitable, selon nous. Un monde ô combien plus séduisant que ceux des autres scénarios du chapitre précédent qui poursuivent leur croissance jusqu'à ce que de multiples crises les en empêchent. Cela dit, le Scénario 9 n'est pas le seul résultat durable que World3 puisse produire. Au sein des limites du système, un certain nombre de compromis et de choix restent possibles. Il pourrait y avoir davantage de nourriture et une production industrielle moins soutenue et vice-versa, plus d'individus ayant chacun une empreinte écologique moins marquée ou moins d'individus mais une empreinte écologique par habitant plus élevée. Mais une chose est claire : chaque fois que la transition vers un équilibre soutenable est repoussée d'un an, l'intérêt

des compromis et des choix qui resteront possibles une fois la transition achevée s'en trouve réduit. C'est ce qu'illustre le graphique suivant, dans lequel les politiques mises en place dans le Scénario 9 sont lancées 20 ans plus tôt.

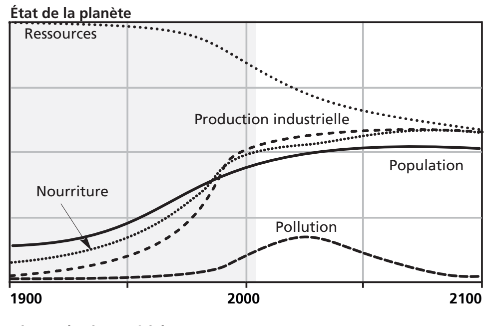
Les 20 années qui font la différence

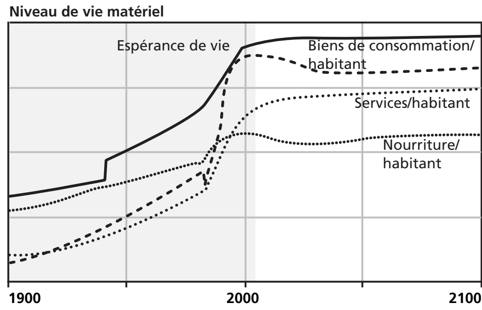
Avec le Scénario 10, nous posons la question suivante : que se passe-t-il si le monde modélisé applique les politiques de durabilité du Scénario 9 (souhait d'une famille de deux enfants, niveau de vie matériel modéré, technologies de pointe en matière d'utilisation efficiente des ressources et de contrôle de la pollution) non pas en 2002 mais dès 1982 ? Quelle différence 20 années font-elles ?

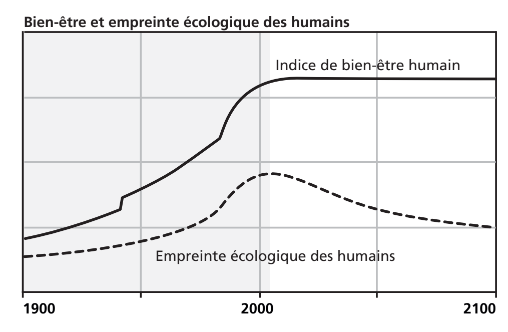
Le Scénario 10, figure 7-4, est l'exact équivalent du Scénario 9 à ceci près que les changements sont introduits en 1982 et non en 2002. Si nous nous étions orientés vers la durabilité 20 ans plus tôt, nous aurions créé plus tôt un monde plus sûr et plus riche et nous aurions connu moins de problèmes d'ajustement dans le secteur agricole. Dans ce scénario, la population se stabilise juste au-dessus des 6 milliards d'individus et non aux alentours de 8 milliards. Le pic que connaît la pollution est nettement moins élevé, intervient 20 ans plus tôt et a bien moins de répercussions sur l'agriculture que dans le Scénario 9. L'espérance de vie dépasse les 80 ans et ne retombe pas. Il reste davantage de ressources non renouvelables à la fin du XXIe siècle et les trouver et les extraire demandent moins d'efforts. L'espérance de vie et la quantité de nourriture, de services et de biens de consommation par habitant connaissent toutes des niveaux plus élevés que dans le Scénario 9.

La population du Scénario 10 parvient sans difficulté à conserver son niveau de vie et à encourager ses technologies, en constante amélioration. Elle vit dans un environnement plus agréable, dispose de plus de ressources et jouit d'une plus grande liberté ; elle se situe plus loin de ses limites et court donc moins de risques

FIGURE 7-4 – Scénario 10 : quand les politiques de durabilité du Scénario 9 sont introduites 20 ans plus tôt, soit en 1982







Cette simulation comporte les mêmes changements que ceux du Scénario 9, mais les politiques sont mises en œuvre en 1982 et non en 2002. Si nous avions avancé vers la durabilité 20 ans plus tôt, le monde aurait connu une population moins nombreuse, moins de pollution, davantage de ressources non renouvelables et un niveau de bien-être légèrement plus élevé pour tous.

que la société du Scénario 9. Cet avenir aurait été possible, mais la communauté mondiale de 1982 n'a pas su saisir l'occasion.

Nous nous sommes servis de World3 pour produire bien d'autres scénarios que les 11 qui sont exposés ici. Nous avons exploré les effets possibles de toutes sortes de variantes des politiques mondiales permettant à la population et à l'économie matérielle de redescendre à des niveaux soutenables. Il y a bien sûr beaucoup de simplifications et d'omissions dans World3, ce qui explique que les chiffres détaillés produits par les différentes simulations n'aient pas de réelle signification. Mais il faut tirer de cette démarche deux enseignements généraux que nous estimons fondés et pertinents. Le premier a trait au fait que lorsqu'on retarde des changements fondamentaux, cela réduit l'éventail d'options qui se présentent à l'humanité pour son avenir à long terme. Lorsqu'on attend pour faire baisser l'accroissement démographique et stabiliser les stocks de capital productif, la population a gagné en nombre, davantage de ressources ont été consommées, les niveaux de pollution sont plus élevés, de plus grandes surfaces agricoles sont détériorées et les flux absolus de nourriture, de services et de biens nécessaires pour subvenir aux besoins de la population sont plus importants. Les besoins et les problèmes augmentent, alors que les capacités sont moindres.

On peut constater tout cela de façon fort claire en mettant en œuvre les politiques du Scénario 9 non pas en 2002, mais 20 ans plus tard, date à laquelle il est trop tard pour éviter le déclin. Ces 20 années permettent en effet à la population d'atteindre les 8 milliards d'habitants bien plus tôt que dans le Scénario 9. Toujours à cause de ces 20 années, la production industrielle atteint un niveau bien plus élevé que dans le Scénario 9. Cette activité industrielle plus soutenue à laquelle s'ajoute ce retard de 20 ans dans la mise en place des technologies de contrôle de la pollution débouchent sur une crise de la pollution. Cette dernière entraîne la baisse du rendement agricole, la quantité de nourriture par habitant chute et avec elle l'espérance de vie et la population. Attendre 20 ans supplémentaires avant d'entamer une

orientation vers la durabilité réduit les possibilités qui s'offrent au monde comme nous l'avons simulé, qui se retrouve embarqué dans une expérience chaotique et finalement sans issue. Les politiques autrefois adéquates ne suffisent désormais plus.

Jusqu'où peut-on aller trop haut ?

Le second enseignement que nous tirons de notre démarche est que si l'on exige trop de consommation de la part du système mondial, on peut échouer. Nous avons en effet réalisé des expériences avec World3 à l'aide des mêmes hypothèses que dans le Scénario 9, à une exception près : nous avons multiplié par 2 la quantité de production industrielle souhaitée par habitant. Le monde décrit par World3 dans ce cas commence, lui aussi, à modérer sa population et son économie en 2002, et à mettre en œuvre les mêmes technologies de conservation des ressources et de réduction de la pollution. Cette fois, cependant, malgré les progrès technologiques, l'objectif de ce monde modélisé en matière de biens industriels par habitant ne peut être atteint avec une population qui compte plus de 7 milliards d'individus.

La production industrielle par habitant remplit ses objectifs pendant une brève période après 2020. Elle atteint un pic aux alentours de 2030 et chute lentement par la suite. La quantité de nourriture par habitant retombe rapidement par rapport au pic atteint à peu près la même année. Cela s'explique par le fait qu'une trop grande quantité de capital est requise pour atteindre des objectifs matériels plus élevés et pour compenser les dégâts causés sur l'environnement. Lors de l'année de simulation 2050, le flux de nourriture et de biens industriels disponibles par habitant dans ce monde plus gourmand est très en deçà de ce qu'il était dans le Scénario 9, où les objectifs en la matière étaient plus modérés.

Ce scénario nous livre-t-il une estimation fiable du niveau de vie qu'un « monde réel » de 7,5 milliards d'individus pourrait atteindre ? En aucune façon ! On ne peut pas accorder suffisamment de crédit aux chiffres et aux hypothèses de notre modèle.

Aucun modèle ne peut produire de données précises sur l'état de la planète dans 30 à 50 ans. Il est possible que, par rapport au Scénario 9, davantage de personnes puissent vivre avec un niveau de vie plus élevé. Mais il est également possible, étant donné la vision édulcorée que World3 a du monde puisqu'il n'intègre ni guerre, ni conflit, ni corruption, ni erreur, que le niveau de consommation du Scénario 9 ne puisse pas être maintenu de façon soutenable.

World3 a, d'une certaine manière, la même utilité que des plans d'architecte. Il montre les interactions entre d'importantes variables. Il nous aide à réfléchir, dans les grandes lignes, à l'avenir que nous aimerions être le nôtre. Mais il ne fournit aucun détail sur les délicates questions politiques, psychologiques et personnelles que l'on rencontre sur la voie de la transition. Il faut des compétences qui dépassent les nôtres pour planifier de telles questions. Et si nous avions ces compétences, il nous faudrait en outre faire preuve d'expérience, d'humilité, de tolérance à l'égard des erreurs que nous aurions faites, et la volonté de rectifier le tir au cours du processus.

Nous ne déduisons pas nécessairement de nos modélisations que la mise en œuvre dès aujourd'hui de politiques soutenables nous mènera vers un avenir radieux tandis qu'un atermoiement de 10 ou 20 ans condamnerait notre société à l'échec. Mais nous tirons la conclusion que tout retard réduit le niveau de richesse auquel nous pourrions prétendre de façon soutenable. Nous ne déduisons pas non plus de nos scénarios qu'en matière de consommation, un objectif équivalent ou supérieur de 10 à 20 % aux niveaux actuels est soutenable et qu'un objectif deux fois plus élevé mènerait tout droit à la catastrophe. Mais nous affirmons qu'un système durable pourrait permettre à un grand nombre d'habitants de la planète aujourd'hui de jouir de niveaux de consommation satisfaisants. En revanche, il ne pourrait pas autoriser des niveaux de consommation matérielle illimités ni même très élevés à une population de 6 à 8 milliards d'individus.

On ne peut pas utiliser World3 pour régler au détail près les paramètres d'une société humaine qui chercherait à vivre à la limite supérieure de ce qui est considéré comme soutenable. Il n'existe actuellement aucun modèle, et il n'en existera probablement jamais, qui permette une telle précision chiffrée. En outre, l'exploitation maximale de l'empreinte écologique est une politique dangereuse étant donné que les véritables limites physiques à la croissance sont variables et incertaines, et que leurs signaux et nos réactions seront toujours tardifs. Il est donc plus sûr, et sans doute aussi préférable pour d'autres raisons, d'apprendre à mener une vie satisfaisante nettement en dessous des limites estimées de la planète plutôt que de sans cesse s'évertuer à obtenir le maximum de ce qui est physiquement possible.

World3 est un modèle conçu pour explorer les schémas comportementaux d'un système fait d'interconnexions, non linéaire, nécessitant un temps de réaction et limité. Il n'est pas censé énoncer des prévisions exactes de l'avenir ni un plan d'action détaillé. Mais les scénarios présentés dans ce chapitre permettent de tirer quelques conclusions générales que nous considérons comme fondées et qui sont loin d'être admises dans les discours publics. Imaginons un instant l'influence qu'auraient sur la prise de décisions, sur l'orientation des investissements, sur la restitution des informations et sur les textes de loi les affirmations suivantes si elles étaient largement diffusées et acceptées :

- Une transition de l'ensemble de la planète vers un monde durable est sans doute possible sans réduction de la population ni de la production industrielle.
- Une transition vers la durabilité nécessitera cependant que des mesures énergiques soient prises pour réduire l'empreinte écologique des humains, ce qui suppose que les individus prennent la décision de réduire le nombre de leurs enfants, que l'on abaisse les objectifs en matière de croissance industrielle et qu'on augmente l'efficience avec laquelle on utilise les ressources de la planète.

- Une société durable peut être structurée de bien des manières, il y a de nombreux choix à faire en matière de démographie, de niveau de vie et d'investissements dans les technologies, ainsi que d'arbitrages à réaliser entre les biens industriels, les services, la nourriture et d'autres besoins matériels. S'il n'est pas nécessaire que ces arbitrages soient faits de la même façon partout dans le monde, il importe néanmoins qu'ils soient réalisés rapidement.
- Il y a forcément des compromis à faire entre le nombre d'individus que la Terre peut supporter et le niveau matériel auquel chaque personne peut prétendre durablement. La teneur chiffrée exacte de ces compromis est impossible à connaître. Elle changera au fil du temps en fonction de l'évolution des technologies, des connaissances, de la capacité des humains à s'en sortir et des mécanismes régulateurs de la biosphère. Malgré cela, la conclusion générale reste la même : davantage d'individus signifie un flux matériel durable moindre et une empreinte écologique plus faible par habitant.
- Plus l'économie mondiale mettra de temps à réduire son empreinte écologique et à s'orienter vers la durabilité, moins la planète pourra tolérer d'individus et plus le niveau matériel de ces derniers sera bas. À partir d'un certain point, retard signifie effondrement.
- Moins la société se fixe d'objectifs ambitieux en matière de population et de niveau de vie matériel, plus elle court le risque de dépasser et d'éroder ses limites.

Si l'on en croit notre modèle informatique, nos modèles mentaux, notre connaissance des données et notre expérience du « monde réel », il n'y a pas de temps à perdre : il faut redescendre en deçà des limites et avoir la durabilité pour objectif. Retarder la réduction des flux et la transition vers la durabilité signifie au mieux priver les générations futures de certaines options et au pire précipiter l'effondrement.

Il n'y a d'ailleurs pas de raison de perdre du temps. La durabilité est un concept nouveau pour beaucoup, et nombreux sont ceux qui ont du mal à le comprendre. Mais partout dans le monde, on rencontre des individus qui s'emploient à imaginer un monde soutenable et à lui donner naissance. Ils ne le voient pas comme un monde vers lequel on va à reculons, mais vers lequel on va avec joie ; ce n'est pas un monde qui exige des sacrifices, c'est une aventure qui commence. Nous aurions en effet tout à gagner à vivre dans un monde soutenable.

La société durable

Il existe bien des façons de définir la *durabilité*. La plus simple consiste à dire qu'une société durable est une société qui perdure sur des générations et des générations et qui est suffisamment prévoyante, flexible et réfléchie pour ne pas fragiliser les systèmes physiques ou sociaux qui la sous-tendent.

En 1987, la Commission mondiale de l'environnement et du développement a donné de la durabilité une définition qui est restée célèbre :

> *Une société durable est une société « qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs »*[2].

Vue sous l'angle de l'analyse des systèmes, une société durable est une société qui a mis en place des mécanismes informationnels, sociaux et institutionnels qui lui permettent de garder le contrôle des boucles de rétroaction positives responsables de la croissance exponentielle de la population et du capital. Cela signifie que le taux de natalité est à peu près égal au taux de mortalité et que le taux d'investissement est, lui aussi, à peu près égal au taux de dépréciation, *sauf si* ou *jusqu'à ce que* certaines évolutions techniques et décisions d'ordre social justifient une modification

2. Commission mondiale de l'environnement et du développement, *Notre avenir à tous*, *op. cit.*

mûrement réfléchie et circonscrite du nombre d'individus et de la quantité de capital. Afin d'être socialement durable, l'association population/capital/technologie doit être configurée de façon à ce qu'un niveau de vie matériel adéquat soit garanti à tous et équitablement réparti. Pour être matériellement et énergétiquement soutenables, les flux économiques doivent remplir ces trois conditions posées par Herman Daly[3] :

- Le taux d'utilisation des ressources renouvelables ne doit pas excéder leur taux de régénération.
- Le taux d'utilisation des ressources non renouvelables ne doit pas excéder le taux auquel des substituts renouvelables à ces ressources sont développés.
- Le taux d'émission de pollution ne doit pas excéder la capacité d'assimilation de l'environnement.

Pareille société, dotée d'une empreinte écologique soutenable, n'aurait rien à voir ou presque avec celle que connaissent actuellement la plupart des individus. Les modèles mentaux, en ce début de XXIe siècle, sont marqués par de puissantes images de pauvreté ou de croissance matérielle rapide et d'incessants efforts pour maintenir cette croissance coûte que coûte. Guidée par des images de croissance insouciante ou de stagnation frustrante, la conscience humaine mondiale ne peut guère se représenter une société réfléchie, suffisante, juste et durable. Mais avant de nous pencher ici sur ce que la durabilité *pourrait* être, il nous faut commencer par ce qu'elle *n'est pas condamnée* à être.

Durabilité ne veut pas dire « croissance zéro ». Une société obnubilée par la croissance a tendance à éviter toute remise en question de cet objectif, mais remettre la croissance en question

3. Herman Daly est l'une des rares personnes à avoir entrepris de réfléchir aux types d'institutions économiques qui pourraient, par leur fonctionnement, permettre l'existence d'un état durable. Il suggère pour cela un mélange intéressant d'économie de marché et de dispositifs de régulation. Voir, par exemple, Herman Daly, « Institutions for a Steady-State Economy », *in Steady State Economics, op. cit.*

ne signifie pas refuser toute croissance. Comme l'a fait remarquer en 1977 Aurelio Peccei, fondateur du Club de Rome, cela reviendrait à remplacer une vision caricaturale par une autre :

> *Tous ceux qui ont contribué à faire voler en éclats le mythe de la croissance ont été tournés en ridicule, métaphoriquement pendus, éviscérés et écartelés par les fidèles partisans de la sacro-sainte croissance. Parmi ces derniers, certains accusent le rapport* [Limits to Growth] *de prôner la CROISSANCE ZÉRO. Ces individus n'ont clairement rien compris, ni au Club de Rome ni à la croissance. La notion de croissance zéro est tellement primitive – à l'instar, d'ailleurs, de celle de croissance infinie – et tellement imprécise que c'est une absurdité conceptuelle d'y faire allusion dans une société vivante et dynamique*[4].

Une société durable rechercherait le développement qualitatif et non l'expansion physique. La croissance matérielle serait pour elle un outil maîtrisé et non un objectif de tous les instants. Ni favorable ni opposée à la croissance, cette société ferait la distinction entre les différents types de croissance et d'objectifs pour y parvenir. Elle pourrait même aller jusqu'à soutenir de façon rationnelle l'idée d'une croissance négative réfléchie pour remédier aux excès, redescendre en deçà des limites et faire cesser les actions qui, lorsqu'on prend en compte tous les coûts naturels et sociaux, ont en réalité un coût supérieur à leur valeur.

Avant de décider d'un quelconque projet de croissance, une société durable poserait les questions suivantes : à quoi sert cette croissance ? À qui bénéficie-t-elle ? Combien coûte-t-elle ? Combien de temps durera-t-elle ? Cette croissance peut-elle être supportée par les sources et les exutoires de la planète ? Cette société ferait appel à ses valeurs et à ses connaissances les plus pointues en matière de limites planétaires pour ne choisir que les types de croissance qui servent d'importants objectifs sociaux tout en œuvrant pour la durabilité. Et une fois qu'un type de croissance

4. Aurelio Peccei, *La qualité humaine*, Paris, Stock, 1976.

physique aurait rempli ses objectifs, la société y mettrait un terme.

Une société durable ne rendrait pas pérennes les modes de répartition actuels qui sont inéquitables. Elle n'enfermerait en aucun cas les pauvres dans leur dénuement, car ce ne serait pas durable pour deux raisons : tout d'abord, ils ne le toléreraient pas et auraient raison. Ensuite, maintenir dans la pauvreté une partie de la population, quelle qu'elle soit, ne stabiliserait pas la démographie, sauf dans les pires contextes coercitifs ou en cas de montée du taux de mortalité. Pour des raisons à la fois pratiques et morales, toute société durable se doit de répondre aux besoins de tous, y compris en matière de sécurité. Pour parvenir à la durabilité, il faut logiquement que le potentiel de croissance qu'il nous reste – c'est-à-dire les ressources qu'on peut encore utiliser et les émissions qu'on peut encore rejeter, à laquelle s'ajoute ce que rendent possible l'amélioration de l'efficience et l'adoption d'un niveau de vie plus modéré dans les pays développés – soit alloué, si possible avec le consentement de tous, à ceux qui en ont le plus besoin.

Une société durable ne se caractériserait *pas* par le découragement et la stagnation, ni par le chômage et la faillite auxquels les systèmes économiques actuels se heurtent lorsque leur croissance est interrompue. La différence entre une société durable et la récession économique actuelle, c'est un peu comme la différence entre une voiture qu'on arrête délibérément au moyen de ses freins et une voiture qui s'arrête parce qu'elle a heurté un mur de brique. Lorsque les économies actuelles connaissent un dépassement, elles basculent trop rapidement et de façon trop inattendue pour que les individus et les entreprises aient le temps de se recycler, se réimplanter ou s'adapter. Alors qu'une démarche volontaire vers la durabilité serait suffisamment lente et préparée pour qu'individus et entreprises puissent trouver leur place dans la nouvelle économie.

Une société durable n'est pas non plus condamnée à retourner à l'âge de pierre technique ou culturel. Au contraire : libérée de

toute crainte et de toute avidité, elle ferait la part belle à la créativité humaine. La société et l'environnement n'ayant pas à supporter le coût élevé de la croissance, la technologie et la culture pourraient s'épanouir. John Stuart Mill, l'un des premiers (et derniers) économistes à avoir considéré avec sérieux le concept d'économie compatible avec les limites de la Terre, considérait que ce qu'il appelait un « état stationnaire » pouvait subvenir aux besoins d'une société en constante évolution et amélioration. Voici ce qu'il écrivait il y a plus de 150 ans déjà :

> *Je ne peux pas considérer un état stationnaire du capital et de la richesse avec la même aversion que celle si généralement affichée par les économistes politiques de la vieille école. Je suis enclin à penser qu'il s'agirait dans l'ensemble d'une amélioration considérable par rapport à notre condition présente. Je dois avouer que je ne suis pas séduit par l'idéal de vie que prônent ceux qui estiment normal que les hommes aient à lutter pour vivre ; que le meilleur sort dont on puisse rêver pour l'homme est de devoir piétiner ses semblables, les écraser et jouer des coudes… Est-il besoin de préciser qu'un état stationnaire du capital et de la population n'implique en rien le même état pour la condition humaine ? Car il y aurait tout autant de possibilités de se cultiver et de progresser sur le plan moral et social ; tout autant d'espace pour l'amélioration de l'Art de vivre et bien plus de probabilités qu'il s'améliore*[5].

Un monde durable ne serait pas et ne pourrait pas être rigide, avec un niveau de population ou de production maintenu constant de façon maladive. L'une des représentations mentales actuelles les plus étranges est celle qui veut qu'une société où dominerait la modération serait obligatoirement régie par un État autoritaire et centralisé. Ce type de contrôle n'est ni possible, ni souhaitable, ni nécessaire dans une économie durable. (Et vu sous l'angle de l'analyse des systèmes, un tel fonctionnement présente de graves défauts, comme l'a amplement prouvé l'ex-Union soviétique.)

5. John Stuart Mill, *Principes d'économie politique*, 1854.

Une société durable aurait bien entendu besoin de règles, de lois, de repères, de frontières, d'accords sociaux, mais aussi de limitations sociales, comme n'importe quelle société humaine. Certaines règles liées à la durabilité seraient différentes des règles auxquelles les humains sont habitués aujourd'hui et certains des contrôles qu'il est nécessaire de mettre en place sont d'ores et déjà à l'œuvre, à l'instar de l'accord international sur l'ozone et des négociations sur les gaz à effet de serre. Mais ces règles en faveur de la durabilité, comme toute règle sociale envisageable, ne seraient pas mises en place pour tuer les libertés, mais au contraire pour les protéger et en créer de nouvelles. Le fait d'interdire les hold-up de banques restreint la liberté du cambrioleur afin que chacun soit libre de déposer et de retirer de l'argent en toute sécurité. L'interdiction de la surexploitation des ressources renouvelables ou du rejet de polluants dangereux protège de la même manière certaines libertés essentielles.

Une imagination débordante n'est pas nécessaire pour concevoir un minimum de règles sociales – des boucles de rétroaction véhiculant de nouvelles informations sur les coûts, les conséquences et les sanctions – qui rendent possibles l'évolution, la créativité et le changement, et octroient bien plus de libertés que ce que ne pourra jamais faire un monde qui continue à se heurter à ses limites ou à les dépasser. Parmi ces règles, l'une des plus importantes s'accorderait parfaitement avec la théorie économique : elle associerait connaissances et réglementation pour « internaliser les externalités » de l'économie de marché, de façon à ce que le prix d'un produit reflète tous les coûts qui ont permis de le produire (y compris les effet secondaires d'ordre social et environnemental). Il s'agit d'une mesure que tous les manuels d'économie appellent de leurs vœux (en vain) depuis des dizaines d'années. Elle orienterait automatiquement les investissements et les achats et les individus feraient des choix monétaires qu'ils ne regretteraient pas ensuite sur le plan matériel ou social.

Certains croient qu'une société durable cesserait d'utiliser les ressources non renouvelables puisqu'elles sont par définition

non durables. C'est interpréter de façon trop rigide la notion de durabilité. Une société durable utiliserait à coup sûr de façon plus réfléchie et plus efficiente que ne le fait le monde actuel les ressources non renouvelables que lui offre la Terre. Elle leur attribuerait un prix juste grâce auquel les générations suivantes disposeraient toujours de ces ressources. Mais il n'y a aucune raison pour ne pas les exploiter à partir du moment où leur utilisation respecte les critères de la durabilité, c'est-à-dire qu'elle ne submerge pas les exutoires naturels et que des substituts renouvelables sont développés.

Une société durable ne se doit pas d'être uniforme. Comme dans la nature, la diversité dans la société des humains serait à la fois la cause et la conséquence de la durabilité. Certains parmi ceux qui ont réfléchi à ce concept imaginent une société largement décentralisée dont les territoires comptent davantage sur leurs ressources locales que sur le commerce international. Certaines règles seraient mises en place pour empêcher les communautés de menacer la viabilité des communautés voisines ou celle de la Terre dans son ensemble. La variété culturelle, l'autonomie, la liberté et l'autodétermination seraient davantage à l'honneur dans une telle société.

Rien ne justifie non plus qu'une société durable soit antidémocratique, ennuyeuse ou sclérosée. Évidemment, certaines activités auxquelles les individus s'adonnent et se consument aujourd'hui, comme la course aux armements ou l'accumulation frénétique de richesses, ne seraient sans doute plus possibles, plus respectées ou plus intéressantes. Mais il resterait néanmoins des jeux, des défis, des problèmes à résoudre, des moyens pour chacun de faire ses preuves, d'aider les autres, de tester ses capacités et de mener une vie satisfaisante, peut-être même plus satisfaisante que cela n'est possible aujourd'hui.

Nous venons donc de dresser une longue liste de ce qu'une société durable n'est *pas* et, ce faisant, nous avons laissé entendre ce qu'une société durable pourrait être. Mais ce n'est pas un petit groupe de modélisateurs qui peut définir cette société en détails ;

pour cela, il faudra faire appel aux idées, à l'inspiration et aux talents de milliards d'individus.

Notre analyse structurelle du système mondial dans cet ouvrage nous autorise seulement à présenter quelques lignes directrices simples qui permettront de restructurer le système et d'avancer vers la durabilité. Cette liste figure ci-dessous. On peut respecter chacune de ces lignes directrices de centaines de manières différentes et à tous les niveaux : personnel, communautaire, entrepreneurial, national et mondial. Certains verront comment appliquer ces lignes directrices dans leur vie de tous les jours ou dans leur culture, ainsi que dans les systèmes politiques et économiques. Chaque pas en direction d'une de ces lignes est un pas vers la durabilité, mais à terme, il faudra suivre toutes les lignes.

- *Planifier à plus long terme.* Pour choisir entre différentes options, s'appuyer beaucoup plus sur leur coût et leurs avantages à long terme et pas simplement sur le résultat qu'elles vont produire sur les marchés actuels ou sur leurs répercussions sur les élections de demain. Développer les incitations, outils et procédures nécessaires pour que les médias, le marché et le monde politique évoquent les problématiques qui s'échelonnent sur des dizaines d'années, leur accordent leur respect et fassent preuve d'une attitude responsable à leur égard.
- *Améliorer les signaux.* S'intéresser davantage au véritable bien-être de la population et au véritable impact de l'activité humaine sur les écosystèmes mondiaux, et surveiller ces deux paramètres[6]. Informer les gouvernements et le grand public des conditions environnementales et sociales avec autant de régularité et de rapidité que des conditions économiques. Inclure les coûts environnementaux et sociaux dans les prix

6. Un bon exemple à cet égard est le *Rapport « Planète Vivante »* publié tous les deux ans par le WWF à Gland, en Suisse, qui fournit des données sur l'état de la biodiversité mondiale et sur l'empreinte écologique des pays.

économiques ; repenser certains indicateurs économiques comme le PIB pour éviter que ne soit fait l'amalgame entre coûts et bénéfices, flux et bien-être ou détérioration du capital naturel et revenus.

- *Accélérer les temps de réaction.* Surveiller les signaux indiquant que l'environnement ou la société ressentent un stress. Prévoir les mesures à prendre en cas de problèmes (prévoir si possible ces derniers avant qu'ils ne surviennent) et faire en sorte que les dispositifs institutionnels et techniques soient toujours en place pour réagir efficacement. Sensibiliser à la flexibilité et à la créativité, encourager l'esprit critique et la capacité à repenser les systèmes physiques et sociaux. La modélisation informatique peut avoir son intérêt dans ce domaine, mais il est tout aussi important d'apprendre la pensée systémique au grand public.
- *Réduire au minimum l'utilisation des ressources non renouvelables.* Les combustibles fossiles, les eaux souterraines fossiles et les minerais ne doivent être exploités qu'avec le maximum d'efficience, ils doivent être recyclés quand c'est possible (c'est le cas pour les minerais et l'eau, mais pas pour les combustibles fossiles) et leur consommation doit s'accompagner d'une transition délibérée vers des ressources renouvelables.
- *Empêcher l'érosion des ressources renouvelables.* La productivité des sols, des eaux de surface, des eaux souterraines rechargeables et de tous les éléments vivants y compris les forêts, le poisson et le gibier doit être préservée et, dans la mesure du possible, restaurée et améliorée. Ces ressources ne doivent être exploitées qu'au rythme auquel elles se régénèrent. Il faut donc faire connaître leur rythme de régénération et user de sanctions sévères ou au contraire d'incitations économiques pour qu'elles ne soient pas surexploitées.
- *Utiliser toutes les ressources avec le maximum d'efficience.* Plus on parvient à assurer le bien-être des humains en respectant une empreinte écologique donnée, meilleure peut être la qualité de vie tout en restant en deçà des limites. Il est à la fois

techniquement possible et économiquement souhaitable d'augmenter considérablement l'efficience[7] et une efficience accrue est déterminante si on veut que la population et l'économie mondiales actuelles redescendent au-dessous des limites sans entrainer d'effondrement.

- *Ralentir et, pour finir, stopper la croissance exponentielle de la population et du capital physique.* Les six premières lignes directrices de cette liste ne peuvent être suivies que dans une certaine limite, c'est pourquoi cette dernière ligne directrice est la plus importante. Elle nécessite des changements institutionnels et philosophiques, et des innovations sociales. Elle implique de définir les niveaux de population et de production industrielle souhaitables et durables, et de déterminer des objectifs centrés sur l'idée de développement et non de croissance. Elle s'appuie, simplement mais fondamentalement, sur une vision plus élargie et plus satisfaisante du sens de la vie, une vision qui ne se cantonne pas aux simples expansion et accumulation physiques.

Nous pouvons nous attarder sur cette mesure si importante en faveur de la durabilité en soulignant les graves problèmes qui accompagnent souvent tout penchant culturel en faveur de la croissance : la pauvreté, le chômage et les besoins insatisfaits. La croissance telle qu'elle est structurée aujourd'hui ne résout pas ces problèmes ou bien ne les résout que lentement et de manière inefficiente. Mais tant que des solutions plus efficaces ne se profilent pas, les humains ne renonceront pas à leur obsession de la croissance, car ils ont absolument besoin de croire en quelque chose. La croissance est peut-être un leurre, mais cela vaut toujours mieux que de ne pas avoir d'espoir du tout.

7. Voir Paul Hawken, Amory Lovins et Hunter Lovins, *Natural Capitalism : comment réconcilier économie et environnement*, *op. cit.*

Pour rétablir l'espoir et résoudre des problèmes tout à fait concrets, voici trois secteurs dans lesquels nous devons entièrement revoir notre mode de pensée :

- *La pauvreté*. Le partage est une notion taboue en politique, sans doute en raison de cette crainte, profondément ancrée en nous : en partageant, nous risquons de manquer de tout. Et pourtant, la « sobriété » et la « solidarité » sont des concepts qui peuvent nous aider à forger de nouvelles approches pour mettre un terme à la pauvreté. Le dépassement nous concerne tous, et il y a assez de tout pour tout le monde si nous pratiquons une gestion réfléchie. Dans le cas contraire, personne, pas même les plus riches, n'échappera aux conséquences.
- *Le chômage*. Les êtres humains ont besoin de travailler, de se tester et de se discipliner, d'endosser la responsabilité de satisfaire leurs propres besoins, de ressentir le plaisir de participer et d'être acceptés en tant qu'adultes et membres responsables de la société. Ce besoin ne doit pas être négligé et il ne doit pas être non plus satisfait par un travail dégradant ou dangereux. Mais le travail ne doit pas pour autant être une condition *sine qua non* à la survie. Nous avons ici besoin de créativité pour échapper à l'idée réductrice selon laquelle certains « créent » des emplois pour d'autres, et de cette autre idée, encore plus réductrice, qui veut que la main-d'œuvre se réduise à des coûts qu'il faut supprimer. Il nous faut un système économique qui utilise et encourage les contributions de chacun, qui répartisse de façon équitable le travail, le temps libre et la production économique et qui n'abandonne pas sur le bord de la route ceux qui, pour des raisons temporaires ou structurelles, ne peuvent pas travailler.
- *Les besoins non matériels non satisfaits*. Les humains n'ont pas besoin de grosses voitures, mais ils ont besoin d'admiration et de respect. Ils n'ont pas un besoin constant de nouveaux vêtements, mais souhaitent sentir chez les autres qu'ils sont séduisants. Ils ont besoin d'enthousiasme, de variété et de

> beauté. Ils n'ont pas besoin d'appareils électroniques, mais il leur faut quelque chose d'intéressant pour nourrir leur esprit et leurs émotions. Et ainsi de suite. Essayer de satisfaire des besoins bien réels mais non matériels – besoins identitaires, d'appartenance à une communauté, d'estime de soi, de relever des défis, d'amour et de bonheur – par des biens matériels, c'est faire naître une insatiable soif de mauvaises solutions qui n'apaiseront jamais aucun désir. Une société qui s'autorise à admettre et à exprimer ses besoins humains non matériels et à trouver des moyens tout aussi immatériels pour les satisfaire peut réduire considérablement ses flux de matière et d'énergie et augmenter tout autant l'épanouissement des humains qui la composent.

Comment, dans la pratique, s'attaquer à ces problèmes ? Comment la planète peut-elle concevoir un *système* qui les résolve ? C'est ici qu'entrent en jeu la créativité et le choix. Les générations présentes en ce début de XXI[e] siècle doivent non seulement ramener leur empreinte écologique en deçà des limites, mais procéder dans le même temps à une restructuration de leurs mondes intérieur et extérieur. Ce processus touche tous les secteurs de la vie et mobilise tous les types de talents humains. Il requiert des innovations techniques et entrepreneuriales, ainsi que de l'inventivité collective, sociale, politique, artistique et spirituelle. Il y a 50 ans, Lewis Mumford reconnaissait l'ampleur de la tâche et son caractère exclusivement humain ; une tâche qui met à contribution et développe l'*humanité* présente en chacun de nous.

> *L'âge de l'expansion cède la place à l'âge de l'équilibre. La réalisation de cet équilibre est notre tâche pour les quelques siècles à venir… Le thème dominant durant cette longue période n'est ni l'homme et ses bras, ni l'homme et ses machines, mais bien la résurgence de la vie, le remplacement du mécanique par l'organique et le rétablissement de la personne en tant que bénéficiaire ultime de tous les efforts humains. Éducation, humanisation, entraide, symbiose : tels sont les maîtres-mots de la nouvelle culture mondiale. Tous les secteurs de*

la vie seront concernés par ce changement : l'éducation et les procédures scientifiques tout autant que l'organisation des entreprises industrielles, l'urbanisme, le développement des régions ou les échanges de ressources mondiales[8].

La nécessité de conduire le monde industriel vers le stade suivant de son évolution n'est pas une mauvaise nouvelle, mais bien une chance inouïe. Comment saisir cette chance, comment faire naître un monde qui ne soit pas seulement durable, fonctionnel et équitable, mais aussi profondément *désirable ?* Voilà bien une question de hauteur de vue, d'éthique, d'imagination et de courage, autant de qualités qui ne sont pas l'apanage des modèles informatiques mais de l'humain, dans sa chair et dans son âme. Pour les évoquer, nous autres auteurs avons besoin de tout un chapitre. Nous allons éteindre nos ordinateurs, mettre de côté nos données et nos scénarios et, dans le chapitre qui suit, vous livrer les conclusions que notre cœur et notre intuition, tout autant que nos analyses scientifiques, nous ont livrées.

---

8. Lewis Mumford, *The Condition of Man*, New York, Harcourt Brace Jovanovich, 1944.

CHAPITRE 8

Transition vers la durabilité : les outils

Prenons garde à ne pas céder à la désespérance, car il reste de temps à autre une lueur d'espoir.

– Edouard Saouma, 1993

Peut-on conduire les nations et les peuples sur le chemin de la durabilité ? Pareille orientation représenterait un changement sociétal d'une ampleur qui n'est comparable qu'à deux grands événements intervenus jusqu'ici : la révolution agricole de la fin du néolithique et la révolution industrielle de ces 200 dernières années. Ces deux événements se sont déroulés de façon progressive, spontanée et en grande partie inconsciente. Celui qui nous attend devra en revanche être une opération pleinement délibérée, guidée par la plus grande prévoyance que la science puisse nous autoriser… Si nous y parvenons réellement, cette entreprise sera la première en son genre depuis que les hommes peuplent la Terre.

– William D. Ruckelshaus, 1989

Cela fait à présent plus de trente ans que nous écrivons sur la durabilité, que nous en parlons et que nous y travaillons. Nous avons eu la chance de rencontrer à travers le monde des collègues par milliers qui, à leur façon, avec les talents et l'environnement qui sont les leurs, œuvrent pour une société durable. Lorsque nous agissons de manière officielle à l'échelle institution-

nelle et lorsque nous écoutons nos dirigeants politiques, nous sommes souvent déçus. Mais lorsque nous travaillons avec des personnes en particulier, nous sommes généralement stimulés.

Partout, nous rencontrons des individus qui se soucient de la Terre, des autres et du bien-être de leurs enfants et de leurs petits-enfants. Ils ont conscience de la misère des humains et de la dégradation de l'environnement qui les entoure et ils se demandent si les bonnes vieilles politiques qui prônent toujours plus de croissance peuvent améliorer la situation. Beaucoup ont la sensation, souvent difficile à exprimer, que le monde prend un mauvais chemin et qu'il va falloir opérer de vastes changements si l'on veut éviter une catastrophe. Ils sont prêts à participer à ces changements, mais ils doivent d'abord croire en leur capacité à apporter quelque chose de positif. *Que pouvons-nous faire ? Que peuvent faire les États ? Que peuvent faire les entreprises ? Et les écoles, les religions et les médias ? Que peuvent faire les citoyens, les producteurs, les consommateurs, les parents ?* Voilà les questions qu'ils se posent.

Les expériences menées à partir de ces questions ont plus d'importance que les réponses précises que l'on peut y apporter, même si ces dernières abondent. Il existe « 50 gestes simples que l'on peut faire pour sauver la planète ». Tout d'abord, acheter une voiture efficiente sur le plan énergétique. Recycler ses bouteilles et ses canettes, voter en connaissance de cause aux élections, si tant est qu'on fasse partie de ces heureux élus qui possèdent une voiture, des bouteilles, des canettes et vivent dans un pays où il y a des élections. Il existe également des gestes pas si simples que cela à faire : élaborer son propre style de vie, élégant parce que sobre, se limiter à deux enfants, réclamer que le prix des combustibles fossiles augmente (pour soutenir l'efficacité énergétique et stimuler le développement d'énergies renouvelables), faire preuve d'amour et de solidarité en aidant une famille à s'extirper de la pauvreté, trouver le « bon mode de subsistance », s'occuper avec affection d'une parcelle de terre, faire ce que l'on peut pour s'opposer aux systèmes qui oppressent les individus ou maltraitent la Terre, ou encore se présenter à des élections.

Toutes ces actions seront utiles. Mais, bien sûr, elles ne suffisent pas. La durabilité, la sobriété et l'équité réclament des changements structurels ; ils nécessitent une révolution, non pas au sens politique du terme comme la Révolution française, mais dans le sens d'un changement bien plus en profondeur, à l'instar des révolutions agricole et industrielle. Il est certes important de recycler, mais le recyclage à lui tout seul ne déclenchera pas une révolution.

Qu'est-ce donc qui en déclenchera une ? Dans notre quête de réponse, il nous a semblé utile de tenter de comprendre les deux premières grandes révolutions de la société humaine à travers ce que les historiens peuvent nous en dire.

Les deux premières grandes révolutions : la révolution agricole et la révolution industrielle

Il y a environ 10 000 ans, après plusieurs millénaires d'évolution, la population humaine atteint le chiffre énorme (pour l'époque) de 10 millions d'individus. Ces derniers sont des chasseurs-cueilleurs nomades, mais dans certaines régions, ils deviennent peu à peu trop nombreux par rapport aux végétaux et au gibier, jusque-là abondants. Pour s'adapter à ce problème des ressources naturelles qui s'amenuisent, les humains optent pour deux solutions. Certains intensifient l'aspect migratoire de leur style de vie. Ils quittent alors leurs terres ancestrales d'Afrique et du Moyen-Orient pour aller peupler d'autres zones où le gibier abonde.

D'autres entreprennent de domestiquer des animaux, de cultiver des végétaux et *s'établissent à un endroit précis*. C'est une idée totalement nouvelle. Par le simple fait de rester au même endroit, ces proto-agriculteurs changent la face du monde, le mode de pensée des humains et la structure de la société à un point qu'ils n'auraient jamais pu prévoir.

Posséder des terres devient, pour la première fois, intéressant. Ceux qui ne sont pas obligés de porter tous leurs biens sur leur dos peuvent accumuler des produits, et certains en accumulent

plus que d'autres. C'est à cette époque que naissent les notions de richesse, de statut, d'héritage, de commerce, d'argent et de pouvoir. Certains peuvent vivre grâce à l'excédent de nourriture produit par les autres. Ils peuvent alors devenir artisans à temps plein, musiciens, scribes, prêtres, soldats, athlètes ou rois. C'est ainsi qu'apparaissent, pour le meilleur et pour le pire, les guildes, orchestres, bibliothèques, temples, armées, compétitions sportives, dynasties et autres villes.

En tant qu'héritiers de cette révolution agricole, nous avons tendance à la considérer comme un gigantesque pas en avant. Le bilan est sans doute plus mitigé. Pour de nombreux anthropologues, en effet, l'agriculture n'a pas amélioré le mode de vie, elle a davantage été un passage obligé permettant de nourrir des populations en constante augmentation. Les paysans sédentarisés obtiennent certes plus de denrées alimentaires à l'hectare que les chasseurs-cueilleurs, mais celles-ci ont une valeur nutritionnelle moindre, sont moins variées et nécessitent bien plus de travail. Les paysans deviennent beaucoup plus vulnérables que les nomades au climat, aux maladies, aux nuisibles, aux invasions étrangères et à l'oppression des classes dirigeantes naissantes. Et ceux qui ne s'éloignent pas des déchets qu'ils génèrent sont victimes des premières pollutions chroniques de l'humanité.

L'agriculture a néanmoins représenté une réponse adaptée à la raréfaction de la faune et de la flore sauvages. Elle a permis à la population de continuer à augmenter, ce qui, au fil des siècles, s'est traduit par un accroissement démographique considérable : l'humanité est passée de 10 millions à 800 millions d'individus en 1750. Mais cette augmentation de la population a entraîné d'autres pénuries, tout particulièrement en matière de terres et d'énergie. Une autre révolution est alors devenue nécessaire.

La révolution industrielle démarre en Angleterre avec le remplacement des arbres, dont la quantité baisse, par du charbon, présent en abondance. L'exploitation de ce combustible soulève des problèmes pratiques : il faut effectuer des travaux de terrassement, construire des mines, pomper de l'eau, transporter le charbon

et contrôler sa combustion. Ces problèmes sont relativement vite résolus par la concentration de main-d'œuvre autour des mines et des usines. Ce phénomène élève alors la technologie et le commerce au rang de secteurs essentiels de la société humaine, reléguant la religion et la morale au second plan.

Tout change à nouveau dans des proportions qu'il était impossible de prévoir. Les machines, et non plus la terre, deviennent les principaux moyens de production. Le féodalisme laisse la place au capitalisme et à l'idéologie ennemie de ce dernier, le communisme. Routes, voies de chemin de fer, usines et cheminées font leur apparition dans le paysage. Les villes enflent. Là encore, le bilan est mitigé. Le travail en usine est encore plus dur et plus avilissant que la culture des champs. Aucun mot ne peut qualifier la saleté de l'air et de l'eau à proximité des nouvelles usines. Le niveau de vie de la plupart de la main-d'œuvre industrielle est bien plus bas que celui des paysans. Mais il n'y a pas de terres disponibles, tandis qu'il y a du travail en usine.

Il est difficile de nos jours d'apprécier à quel point la révolution industrielle a modifié le mode de pensée des humains, car ce dernier est toujours celui qui prévaut actuellement. En 1988, l'historien Donald Worster a décrit sans doute mieux qu'aucun autre de ses héritiers ou de ses adeptes l'impact philosophique de l'industrialisme :

> *Les capitalistes ont promis que, grâce à la domination technologique de la Terre, ils pourraient fournir à tous une vie plus juste, plus raisonnable, plus efficiente et plus productive… Leur méthode consistait tout simplement à libérer l'entreprise individuelle du joug des traditionnelles hiérarchies et communautés, que ce joug émane d'autres humains ou de la Terre… Cela impliquait d'apprendre aux hommes à s'affirmer de manière franche et énergique vis-à-vis de la Terre et vis-à-vis les uns des autres… Les hommes devaient constamment penser à ce qu'ils allaient pouvoir gagner comme argent. Ils devaient considérer tout ce qu'il y avait autour d'eux – la terre, ses ressources naturelles, leur propre travail – comme des produits potentiels qui pouvaient être sources de profits sur un marché quelconque. Ils devaient exiger le droit de produire, d'acheter et de*

> *vendre ces produits sans régulation ni interférence extérieures… À mesure que les besoins se sont multipliés et que les marchés se sont étendus, le lien entre les hommes et le reste de la nature s'est réduit à l'instrumentalisme le plus absolu*[1].

Cet instrumentalisme se traduit par une productivité considérable et par un monde qui subvient plus ou moins bien aux besoins de 6 000 millions d'individus, soit plus de 600 fois la population présente avant la révolution agricole. Les marchés tentaculaires et la demande qui ne cesse d'augmenter sont les moteurs de l'exploitation environnementale, depuis les pôles jusqu'aux tropiques et depuis les sommets enneigés jusqu'aux profondeurs sous-marines. Mais la réussite de la révolution industrielle, à l'instar de celle de la chasse, de la cueillette et de l'agriculture, finit par engendrer ses propres pénuries ; il n'est plus seulement question de gibier, de terres, de combustibles ou de métaux, mais de la capacité de charge totale de l'environnement mondial. Une fois encore, l'empreinte écologique de l'humanité va au-delà de ce qui est soutenable. Et une fois encore, la réussite crée le besoin d'une nouvelle révolution.

Vers la révolution de la durabilité

Personne aujourd'hui ne peut décrire le monde qui pourrait naître d'une révolution de la durabilité, pas plus que les paysans de l'an 6000 avant Jésus-Christ n'auraient pu imaginer les champs de maïs et de soja de l'Iowa actuel, ou les mineurs anglais du XIXe siècle une chaîne de montage chez Toyota. Tout comme les grandes révolutions passées, celle de la durabilité changera la face de notre agriculture et les fondements de l'identité, des institutions et de la culture humaines. Et tout comme les révolutions passées, il lui faudra des siècles avant d'être pleinement à l'œuvre, bien qu'elle soit déjà en marche.

1. Donald Worster, *The Ends of the Earth*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988.

Bien sûr, personne ne sait comment déclencher pareille révolution. Il n'existe pas de mode d'emploi du type : « Pour réaliser un changement de paradigme mondial, suivre les 20 étapes suivantes ». Comme les grandes révolutions qui l'ont précédée, celle-ci ne peut être ni planifiée ni dictée. Elle n'obéira pas à une suite de décrets gouvernementaux ni aux proclamations de modélisateurs informatiques. La révolution de la durabilité sera organique. Elle découlera de l'inspiration, des idées, des expériences et des actions de milliards d'individus. La responsabilité de son avènement ne repose sur les épaules d'aucune personne ni d'aucun groupe. Personne ne pourra s'en attribuer le mérite, mais chacun pourra y participer.

Grâce à notre formation en dynamique des systèmes et aux expériences que nous avons menées dans le monde entier, nous avons pris conscience de deux propriétés des systèmes complexes qui sont en rapport avec le type de révolution en profondeur dont il est ici question.

La première est que l'information est la clé de la transformation. Cela ne signifie pas obligatoirement *plus* d'informations, de meilleures statistiques, de plus grandes bases de données ni Internet, même si chacun de ces éléments a un rôle à jouer. Cela signifie des informations *pertinentes, convaincantes, triées sur le volet, importantes, opportunes et précises* parvenant, grâce à de nouveaux modes de diffusion, à de nouveaux destinataires, transportant du contenu nouveau et proposant de nouvelles règles et de nouveaux objectifs (lesquels règles et objectifs constituent en eux-mêmes de l'information). N'importe quel système dont le flux d'informations change se comporte différemment. La politique de la *glasnost*, par exemple, c'est-à-dire l'ouverture pure et simple des voies d'information qui avaient longtemps été verrouillées en Union soviétique, a permis une transformation rapide de l'Europe de l'Est à laquelle personne ne s'attendait. L'ancien système avait été maintenu au moyen d'un contrôle étroit de l'information, mais lorsque ce contrôle a été levé, la

restructuration du système a été totale (agitée et imprévisible, certes, mais inévitable).

La seconde propriété veut que les systèmes résistent farouchement aux changements affectant les flux d'informations, surtout lorsqu'ils touchent aux règles et aux objectifs. Il n'y a d'ailleurs rien d'étonnant au fait que ceux qui tirent profit du système actuel s'opposent autant à toute révision. Les puissantes cliques politiques, économiques et religieuses peuvent presque réduire à néant les tentatives d'individus ou de petits groupes de personnes pour fonctionner selon des règles différentes ou pour fixer des objectifs autres que ceux que le système a faits siens. Les innovateurs sont alors ignorés, marginalisés, tournés en ridicule, on leur refuse toute promotion, on leur coupe les ressources ou on les empêche de s'exprimer en public. Ils peuvent être supprimés au sens propre comme au sens figuré.

Il n'y a cependant que les innovateurs, en percevant le besoin d'informations, de règles et d'objectifs nouveaux, en communiquant à leur sujet et en les testant, qui puissent procéder aux changements qui transforment un système. Ce point important a été exprimé clairement dans une phrase généralement attribuée à Margaret Mead : « Ne doutez jamais de la faculté d'un petit groupe de personnes à changer le monde. C'est bien la seule manière dont on y soit jamais arrivé. »

Nous avons appris à nos dépens qu'il est difficile de mener une vie faite de sobriété au sein d'un système qui nous exhorte à consommer, et nous récompense si nous le faisons. Mais il est possible de faire un grand pas en direction de cette sobriété. Il n'est pas non plus facile d'utiliser l'énergie de manière efficiente dans une économie qui fournit des produits inefficients, Mais il est possible de rechercher et, si nécessaire, d'inventer des façons de procéder plus efficientes et, ce faisant, de les rendre plus accessibles aux autres.

Et il est encore plus difficile de produire de nouvelles informations dans un système qui est conçu pour n'en entendre que

d'anciennes. Essayez donc de remettre en question en public la poursuite de la croissance ou de faire simplement la distinction entre croissance et développement et vous comprendrez ce que nous voulons dire. Il faut du courage et de la détermination pour bousculer un système établi, mais on peut le faire.

Au cours de nos recherches sur les moyens de parvenir à une restructuration en douceur d'un système qui, naturellement, résiste à sa propre transformation, nous avons testé de nombreux outils. Les plus évidents sont présentés dans cet ouvrage ; il s'agit de l'analyse rationnelle, de la collecte de données, de la pensée systémique, de la modélisation informatique et des explications les plus claires que nous ayons pu trouver. Ce sont des outils dont n'importe quelle personne versée dans les sciences et l'économie peut se saisir. À l'instar du recyclage, ils sont utiles, nécessaires mais insuffisants.

Nous ignorons ce qui suffira, mais nous aimerions conclure en présentant cinq autres outils que nous avons trouvés *efficaces*. Nous les avions présentés et en avions débattu pour la première fois dans l'ouvrage de 1992. L'expérience que nous avons acquise depuis nous a confortés dans l'idée que ces cinq outils ne sont pas facultatifs. Ils représentent au contraire les caractéristiques primordiales de toute société qui souhaite survivre à long terme. Nous les présentons donc à nouveau dans ce chapitre de conclusion « non pas comme les moyens pour se rapprocher de la durabilité, mais comme certains des moyens pour ce faire ».

« Nous hésitons quelque peu à en parler », écrivions-nous en 1992, « parce que nous ne sommes pas des spécialistes de leur utilisation et parce qu'ils nécessitent l'emploi de termes qu'on ne retrouve pas aisément dans la bouche des scientifiques ni dans leurs logiciels de traitement de texte. Ils sont considérés comme trop "non scientifiques" pour être pris au sérieux dans l'arène publique encline au cynisme. »

Quels sont donc ces outils que nous avons introduits avec autant de précaution ?

Ils s'appellent inspiration, travail en réseau, honnêteté, apprentissage et amour.

Cette liste semble bien modeste comparativement à l'ampleur de la tâche qui nous attend. Mais si chacun de ces outils était présent dans un réseau de boucles positives et s'ils étaient utilisés constamment par un nombre même relativement faible de personnes au début, des changements considérables, voire un bouleversement du système actuel et, peut-être, une révolution pourraient advenir.

Nous écrivions en 1992 : « La transition vers une société durable pourrait être accélérée rien qu'en employant plus souvent ce genre de termes, avec sincérité et sans retenue, dans les flux d'informations qui parcourent la planète. » Mais nous éprouvions nous-mêmes une certaine honte à les utiliser, car nous savions comment ils allaient généralement être perçus.

Nombre d'entre nous éprouvent des difficultés à compter sur des outils aussi « tendres » quand l'avenir de notre civilisation est en jeu, surtout que nous ne savons pas comment les mobiliser, en nous-mêmes ou chez les autres. Nous choisissons donc de les mépriser et de centrer la conversation sur le recyclage, les échanges de permis d'émission, la préservation de la vie sauvage ou sur tout autre aspect nécessaire mais limité de la révolution de la durabilité, aspects qu'au moins nous maîtrisons.

Parlons donc à présent de ces outils que nous ne savons pas encore utiliser, car l'humanité doit rapidement en acquérir la maîtrise.

L'inspiration

Avoir de l'inspiration, c'est imaginer, sur un plan général dans un premier temps puis avec de plus en plus de précision, ce que l'on veut réellement. *Ce que l'on veut réellement* et non ce qu'on nous a appris à vouloir ou ce dont on nous a appris à nous contenter. Avoir de l'inspiration, c'est se libérer du carcan de la « faisabilité », de l'incrédulité et des déceptions, et laisser son esprit s'attarder

sur ses rêves les plus nobles et les plus envoûtants, sur ceux qu'on chérit le plus.

Certains individus, surtout chez les jeunes, laissent parler leur inspiration avec aisance et enthousiasme. D'autres trouvent l'exercice effrayant ou pénible, car l'image séduisante de ce qui *pourrait être* rend ce qui est d'autant plus intolérable. D'autres encore n'acceptent pas ce que leur inspiration leur livre par peur d'être qualifiés d'irréalistes ou d'utopistes. Ils trouveraient ces lignes difficiles à lire, s'ils acceptaient même de les lire. D'autres, enfin, ont été tellement traumatisés par leurs expériences que la seule chose qu'ils peuvent dire est pourquoi toute inspiration est impossible. Soit. Nous avons aussi besoin de personnes sceptiques. Elles sont là pour cadrer notre inspiration.

Commençons par dire, ce qui plaira à ces dernières, que l'inspiration ne suffit pas, selon nous. L'inspiration sans l'action ne sert à rien. Mais l'action sans l'inspiration est désorientée et hésitante. Non seulement l'inspiration est absolument indispensable pour nous guider et nous motiver, mais lorsqu'elle est largement partagée et résolument suivie, elle *donne naissance à de nouveaux systèmes.*

Cette dernière phrase est à prendre au pied de la lettre. Au sein de nos limites spatiales, temporelles, matérielles et énergétiques, les intentions que les humains puisent dans leur imagination peuvent non seulement engendrer de nouvelles informations, de nouvelles boucles de rétroaction, de nouveaux comportements, de nouvelles connaissances et de nouvelles technologies, mais aussi de nouvelles institutions, de nouvelles structures physiques et de nouveaux pouvoirs dans l'environnement humain. Ralph Waldo Emerson reconnaissait cette vérité profonde il y a 150 ans déjà :

> *Toute nation et tout homme s'entourent instantanément d'un arsenal matériel qui reflète à la perfection leur état moral ou leurs pensées. Voyez comme chaque vérité et chaque erreur, toutes deux nées dans l'esprit d'un être humain, s'expriment à travers les sociétés, les habitations, les villes, le langage, les cérémonies, les journaux. Voyez les*

> *idées du temps présent et observez comment chacune de ces abstractions s'est incarnée dans l'imposant arsenal de la communauté, et comment le bois, la brique, la chaux et la pierre ont pris la forme que l'on attendait d'eux, obéissant en cela à la pensée dominante qui règne dans l'esprit de beaucoup…*
>
> *S'ensuit, naturellement, que le moindre changement chez l'homme modifie son environnement ; le moindre développement de ses idées, la moindre atténuation de ses sentiments par rapport aux autres hommes entraîne l'évolution la plus spectaculaire des éléments extérieurs*[2].

Un monde durable ne peut être entièrement mis en œuvre que s'il inspire le plus grand nombre. Ce n'est qu'à cette condition que l'inspiration peut être convaincante. Afin d'encourager d'autres personnes à intégrer le processus, nous avons fait la liste de ce que nous voyons lorsque nous imaginons la société durable dans laquelle nous aimerions vivre, par opposition à celle dont nous nous contenterions. Cette liste n'est en aucun cas exhaustive. Elle n'est là que pour vous inviter à l'étoffer.

- Durabilité, efficience, sobriété, équité, beauté et esprit communautaire comme valeurs sociales suprêmes.
- Suffisance matérielle et sécurité pour tous. En conséquence, par décision individuelle autant que commune, taux de natalité faible et population stable.
- Le travail comme source de dignité et non d'avilissement. Inciter les individus à donner le meilleur d'eux-mêmes pour la société et leur apporter une forme de récompense, tout en faisant en sorte que chacun ait assez dans n'importe quelles circonstances.
- Des dirigeants honnêtes, respectueux, éclairés, humbles et davantage intéressés par leur travail que par le fait de conserver

2. Ralph Waldo Emerson, conférence sur « La guerre » donnée à Boston en mars 1838. Reprise dans *Emerson's Complete Works*, vol. 11, Boston, Houghton Mifflin, 1887.

leur poste, par le fait de servir la société que par la victoire aux élections.

- L'économie comme moyen et non comme fin, au service de la bonne santé de l'environnement et non l'inverse.
- Des systèmes efficients s'appuyant sur des énergies renouvelables.
- Des systèmes matériels efficients en boucle fermée.
- Une conception technique qui réduit au maximum les émissions et les déchets, et des accords sociétaux prévoyant de ne pas produire d'émissions ni de déchets que la technologie et la nature ne peuvent absorber.
- Une agriculture régénératrice qui façonne les sols, se sert des mécanismes naturels pour restaurer les nutriments et contrôler les nuisibles et produit en abondance des denrées alimentaires non contaminées.
- La préservation des écosystèmes dans leur diversité et des humains vivant en harmonie avec cet environnement. Nécessité en conséquence d'une grande diversité naturelle et culturelle et de la sensibilisation des humains à cette diversité.
- Flexibilité, innovation (sociale aussi bien que technique) et remise en cause intellectuelle. Des sciences en effervescence, un enrichissement continu des connaissances des humains.
- La meilleure compréhension de systèmes entiers comme aspect essentiel de l'éducation de chacun.
- La décentralisation du pouvoir économique, de l'influence politique et de l'expertise scientifique.
- Des structures politiques permettant d'équilibrer les considérations à court et à long terme ; le moyen d'exercer aujourd'hui des pressions politiques au nom de nos petits-enfants.
- Des citoyens et des gouvernements ayant des compétences avancées en matière de résolution pacifique des conflits.
- Des médias qui reflètent la diversité du monde et qui, dans le même temps, unissent les cultures grâce à des informations pertinentes, ciblées, opportunes, objectives et intéressantes replacées dans leur contexte historique et systémique.

- Avoir des raisons de vivre et de penser du bien de soi qui n'impliquent pas l'accumulation de biens matériels.

Le travail en réseau

Nous ne pourrions pas faire notre travail sans les réseaux. La plupart de ceux auxquels nous appartenons sont informels, ils disposent de petits budgets (quand ils ont un budget) et très peu figurent dans les listes d'organisations internationales[3]. Ils sont quasi invisibles, mais leur action est loin d'être négligeable. Les réseaux informels véhiculent l'information de la même façon que le font les institutions formelles, mais souvent de manière plus efficace. Ils sont le point d'arrivée naturel des nouvelles informations, et de nouvelles structures systémiques peuvent en sortir[4].

Certains de nos réseaux sont très locaux, d'autres sont internationaux. Certains sont électroniques, d'autres impliquent des personnes qui se côtoient tous les jours. Quelle que soit la forme qu'ils prennent, ils sont constitués d'individus qui partagent le même intérêt pour certains aspects de la vie, qui sont en contact et transmettent des données, des outils, des idées et des encouragements, qui s'apprécient, se respectent et se soutiennent. L'une des fonctions les plus importantes d'un réseau est de simplement rappeler à ses membres qu'ils ne sont pas seuls.

Un réseau est non hiérarchique. Il établit des connexions entre des personnes égales entre elles et tient non par la force, par obligation, par des incitations matérielles ou par un contrat

---

3. Quelques exemples de réseaux connus des auteurs et se rapportant à leurs centres d'intérêt : Balaton Group (<www.balatongroup.org>), NorthEast Organic Farming Association (NOFA), Center for a New American Dream (CNAD ; <www.newdream.org>), Greenlist, Greenclips (<www.greenclips.com>), Northern Forest Alliance, Land Trust Alliance (<www.lta.org>), International Simulation and Gaming Association (ISAGA ; <www.isaga.info>), et Leadership of Environment and Development (LEAD).

4. Ce genre d'étape intermédiaire est illustré par l'ICLEI (Conseil international pour les initiatives écologiques locales), une association internationale regroupant à l'heure actuelle 450 instances locales qui mettent en œuvre la durabilité. Voir <www.iclei.org>.

social, mais par des valeurs communes et par la conviction partagée que certaines tâches qu'on ne peut accomplir seul peuvent être accomplies à plusieurs.

Nous connaissons des réseaux d'agriculteurs qui partagent des méthodes de contrôle phytosanitaire. Il existe des réseaux de journalistes environnementaux, des réseaux « verts » d'architectes, de modélisateurs, de concepteurs de jeux, d'administrateurs fonciers et de coopératives de consommateurs. Des milliers de réseaux se mettent en place à mesure que se rencontrent des individus partageant des intérêts communs. Certains prennent une telle importance qu'ils se transforment en organisations formelles dotées de bureaux et d'un budget, mais la plupart se créent et disparaissent selon les besoins. L'avènement d'Internet a bien entendu facilité et accéléré la constitution et le maintien des réseaux.

Il est particulièrement important qu'existent des réseaux consacrés à la durabilité, au niveau local et mondial, si l'on veut créer une société durable qui soit en harmonie avec les écosystèmes locaux et qui respecte les limites de la planète. Nous savons peu de chose des réseaux de proximité, car chaque localité est différente. L'une des fonctions de ces réseaux est de rétablir le sens de la communauté et la relation au lieu où l'on vit, qui ont largement disparu depuis la révolution industrielle.

S'agissant des réseaux internationaux, nous souhaiterions qu'ils soient réellement mondiaux. Les moyens de prendre part aux flux d'informations internationaux sont aussi mal répartis que les moyens de production. On dit ainsi qu'il y aurait davantage de téléphones à Tokyo que dans toute l'Afrique. Ce doit être *a fortiori* le cas des ordinateurs, des fax, des connexions aériennes et des invitations aux sommets internationaux. Mais, une fois encore, les miracles de l'inventivité humaine semblent avoir apporté une solution étonnante sous la forme d'Internet et des dispositifs d'accès bon marché.

On pourrait estimer que l'Afrique et d'autres régions sous-représentées du monde devraient commencer par répondre aux

nombreux autres besoins qu'elles ont en dehors des ordinateurs et de l'accès à Internet. Ce n'est pas notre avis. Les besoins des populations moins bien loties ne peuvent se manifester de façon efficace que si leur voix peut être entendue et c'est également ainsi que le monde pourra recevoir leur contribution. Certaines des plus grandes avancées en matière d'efficience matérielle et énergétique se retrouvent dans la conception des moyens de communication. Il est donc possible, tout en respectant une empreinte écologique durable, que chacun ait accès aux réseaux internationaux et locaux. Nous devons réduire la « fracture numérique ».

Si certains aspects de la révolution de la durabilité vous passionnent, vous trouverez toujours un réseau qui partage votre intérêt. Ce réseau vous aidera à savoir où chercher l'information, quelles publications et quels outils sont disponibles, où obtenir un soutien administratif et financier et à qui demander de l'aide pour certaines tâches particulières. Un bon réseau ne vous aidera pas seulement à apprendre, mais vous permettra aussi de transmettre vos connaissances aux autres.

L'honnêteté

Nous ne sommes pas plus sûrs de la vérité que quiconque, mais nous reconnaissons souvent un mensonge lorsque nous en entendons un. De nombreux mensonges sont délibérés et perçus comme tels à la fois par leur auteur et leurs destinataires. Ils servent à manipuler, à rassurer, à séduire, à remettre toute action à plus tard, à justifier un comportement intéressé, à acquérir ou à conserver le pouvoir ou à nier une réalité déplaisante.

Les mensonges faussent le flux d'informations. Un système ne peut pas fonctionner correctement si ses flux d'informations sont corrompus par des mensonges. L'un des principes les plus importants de la théorie des systèmes, pour des raisons que nous espérons avoir expliquées clairement dans cet ouvrage, est que l'information ne doit pas être déformée, retardée ni tenue secrète.

Buckminster Fuller disait : « C'est toute l'humanité qui est en danger si chacun de nous ne fait pas attention, maintenant et à l'avenir, à ne dire toujours que la vérité, toute la vérité. Dès maintenant[5]. » Chaque fois que vous vous adressez à quelqu'un dans la rue ou au travail, ou à un groupe de personnes et tout particulièrement à un enfant, vous avez l'occasion d'aller à l'encontre des mensonges et de dire la vérité. Vous pouvez affirmer que ce n'est pas en accumulant toujours plus de biens qu'on est une meilleure personne ou remettre en question l'idée selon laquelle en donnant davantage aux riches, on aide les pauvres. Plus vous irez à l'encontre de la désinformation, plus notre société sera facile à gérer.

Voici quelques-uns des préjugés, des simplifications, des pièges de la langue orale et des mensonges populaires que l'on rencontre fréquemment lorsqu'on parle des limites à la croissance. Il faut selon nous les stigmatiser et les éviter si l'on veut que les populations aient une idée juste de l'économie humaine et de son rapport avec notre planète finie.

Non pas : une mise en garde concernant l'avenir est une prévision funeste.

Mais : une mise en garde concernant l'avenir est une invitation à suivre une voie différente.

Non pas : l'environnement est un luxe, une exigence ou un produit que les individus s'autorisent lorsqu'ils en ont les moyens.

Mais : l'environnement est à la base de toute vie et de toute économie. Les sondages d'opinion montrent le plus souvent que les populations sont prêtes à payer davantage pour avoir un environnement sain.

Non pas : tout changement est un sacrifice à éviter.

Mais : tout changement est un défi nécessaire.

5. R. Buckminster Fuller, *Critical Path*, New York, St. Martin's Press, 1981.

Non pas : en stoppant la croissance, on enferme les pauvres dans leur dénuement.

Mais : c'est la cupidité et l'indifférence des riches qui enferment les pauvres dans leur dénuement. Ces derniers ont besoin que les riches adoptent une attitude différente à leur égard ; c'est seulement à cette condition que la croissance répondra à leurs besoins.

Non pas : chacun devrait pouvoir s'élever pour atteindre le niveau de vie matériel des pays les plus riches.

Mais : il n'est pas possible d'élever le niveau de consommation matérielle de tous pour qu'ils soit équivalent à celui des riches. Les besoins matériels fondamentaux de chacun doivent être satisfaits. Au-delà, les besoins matériels ne doivent être satisfaits que si c'est possible, pour tous, et en respectant une empreinte écologique soutenable.

Non pas : toute croissance est bonne, il n'y a pas à se poser de questions, à faire de discriminations ni à chercher plus loin.

Non pas : toute croissance est mauvaise.

Mais : nous avons besoin non pas de croissance, mais de développement. Dans la mesure où ce dernier nécessite une expansion physique, il doit être équitable, accessible et durable, et tous les coûts réels doivent être pris en compte.

Non pas : la technologie résoudra tous les problèmes.

Non pas : la technologie n'est que source de problèmes.

Mais : nous devons encourager les technologies qui réduisent l'empreinte écologique, augmentent l'efficience et les ressources, améliorent les signaux et mettent fin à la privation matérielle.

Mais : nous devons traiter les problèmes en êtres humains et ne pas nous en remettre à la seule technologie.

Non pas : l'économie de marché va automatiquement nous apporter l'avenir que nous souhaitons.

Mais : nous devons commencer par décider nous-mêmes de l'avenir que nous voulons. Ensuite seulement, nous pouvons nous

servir de l'économie de marché ainsi que d'autres dispositifs organisationnels pour y parvenir.

Non pas : l'industrie est la cause de tous nos maux ou le remède.

Non pas : l'État est la cause ou le remède.

Non pas : les protecteurs de l'environnement sont la cause ou le remède.

Non pas : tout autre groupe [par exemple les économistes] est la cause ou le remède.

Mais : tous les individus et toutes les institutions ont leur rôle à jouer au sein de l'imposante structure du système. Dans un système structuré pour le dépassement, tous les acteurs vont œuvrer, de façon délibérée ou par inadvertance, au dépassement. En revanche, dans un système conçu pour la durabilité, les industries, les États, les défenseurs de l'environnement et tout particulièrement les économistes vont jouer un rôle déterminant dans son édification.

Non pas : pessimisme constant.

Non pas : optimisme béat.

Mais : se résoudre à dire la vérité sur les réussites comme sur les échecs du présent et sur les potentialités comme sur les obstacles de l'avenir.

Et surtout : avoir le courage d'admettre et de supporter les difficultés du présent tout en gardant en permanence l'image d'un avenir meilleur.

Non pas : le modèle World3, comme tout autre modèle, est bon ou mauvais.

Mais : tous les modèles, y compris ceux que produit notre cerveau, sont partiellement bons, beaucoup trop simples et en majorité mauvais. Comment faire pour tester nos modèles et savoir ce qu'ils ont de bon et de mauvais ? Comment s'adresser les uns aux autres en tant que modélisateurs, en trouvant le bon équilibre entre scepticisme et respect ? Comment arrêter de jouer

entre nous à des jeux où tout est bon ou mauvais et se mettre à concevoir des tests de qualité pour nos modèles qui s'opposent au monde réel ?

Ce dernier défi, trier les modèles et les tester, nous amène au sujet de l'apprentissage.

L'apprentissage

L'inspiration, le travail en réseau et l'honnêteté ne sont d'aucune utilité s'ils ne se traduisent pas par des actes. Il existe un grand nombre de choses à faire pour atteindre la durabilité. Il faut mettre au point de nouvelles techniques agricoles, lancer de nouvelles entreprises et repenser les anciennes pour réduire leur empreinte écologique. Il faut restaurer la terre, protéger les parcs, transformer les systèmes énergétiques et parvenir à des accords sur le plan international. Il faut voter certaines lois et en abroger d'autres, enrichir les connaissances des enfants comme des adultes, tourner des films, jouer de la musique, publier des livres, créer des sites web, conseiller les individus, diriger des groupes, supprimer des subventions et en créer d'autres, développer les indicateurs de durabilité et ajuster les prix pour qu'ils reflètent les coûts réels.

Chacun trouvera l'action qui lui convient le mieux dans tout cela. Nous n'avons pas la prétention de prescrire un rôle spécifique à d'autres personnes qu'à nous-mêmes. Mais nous aimerions vous faire une suggestion : quoi que vous fassiez, faites-le en toute humilité. Ne considérez pas votre action comme incontournable, mais comme expérimentale. Servez-vous-en, quelle qu'elle soit, pour apprendre.

Le gouffre de l'ignorance humaine est beaucoup plus profond que beaucoup d'entre nous ne veulent bien l'admettre. C'est particulièrement vrai à une époque où l'économie mondiale n'a jamais autant constitué un tout, où cette économie se heurte aux limites d'une planète extraordinairement complexe et où des modes de pensée entièrement nouveaux s'imposent. En pareille

période, personne n'est assez savant. Aucun dirigeant, aussi autoritaire qu'il prétende être, ne comprend ce qui se passe. Aucune politique ne doit être imposée en bloc à l'ensemble de la planète. Car quand on ne peut pas se permettre de perdre, on ne joue pas.

Apprendre signifie être prêt à aller lentement, à faire des essais et à recueillir les informations sur les effets de l'action, y compris celles, primordiales mais pas toujours agréables à entendre, indiquant que l'action ne fonctionne pas. On ne peut apprendre sans faire d'erreurs, sans dire la vérité à leur sujet et sans persévérer. Apprendre signifie explorer une nouvelle voie avec énergie et courage, être à l'écoute des voies explorées par d'autres et être prêt à changer de voie si l'une d'elles mène plus directement au but.

Les dirigeants internationaux ont perdu tout à la fois l'habitude d'apprendre et la liberté de le faire. Le système politique a évolué de telle façon que les électeurs attendent de leurs dirigeants qu'ils aient réponse à tout, que seul un petit nombre d'individus accèdent au rang de dirigeants et que ces derniers soient rapidement déchus lorsqu'ils proposent des remèdes douloureux. Ce système pervers sape les aptitudes à diriger des individus et les aptitudes à apprendre des dirigeants.

Il est à présent temps pour nous d'être honnêtes à ce sujet : les dirigeants de la planète ne savent pas mieux que n'importe quel autre individu comment mettre en place une société durable. La plupart d'entre eux ignorent d'ailleurs que c'est nécessaire. La révolution de la durabilité implique donc que chacun agisse en tant que dirigeant en plein apprentissage à quelque niveau que ce soit : familial, communautaire, national ou mondial. Et elle implique que nous soutenions nos dirigeants en les autorisant à admettre leurs incertitudes, à mener des expériences honnêtes et à reconnaître leurs erreurs.

Personne ne peut être libre d'apprendre sans patience ni indulgence. Mais en période de dépassement, il n'y a pas beaucoup de place pour ces deux qualités. Trouver le bon équilibre

entre les notions apparemment contraires que sont l'urgence et la patience, la responsabilité et l'indulgence est une tâche qui réclame de la compassion, de l'humilité, de la lucidité, de l'honnêteté et ce mot si dur à prononcer, cette ressource qui semble parfois si rare : de l'amour.

L'amour

Notre culture industrielle ne nous autorise pas à parler d'amour, sauf au sens le plus romantique et le plus classique du terme. Quiconque en appelle à la faculté des individus à éprouver de l'amour fraternel, à aimer l'humanité tout entière, la nature et notre planète nourricière a plus de chances d'être tourné en ridicule que d'être pris au sérieux. La principale différence qui sépare les optimistes des pessimistes porte sur la capacité des humains à fonctionner collectivement sur la base de l'amour. Or dans une société qui met systématiquement en avant l'individualisme, l'esprit de compétition et les préoccupations à court terme, les pessimistes sont largement majoritaires.

L'individualisme et le manque de prévoyance sont selon nous les deux principaux maux du système social actuel et les deux principaux responsables de notre non-durabilité. Il faut donc institutionnaliser l'amour et la compassion dans les solutions collectives. Une culture qui ne croit pas dans ces qualités humaines supérieures, qui ne les évoque ni ne les développe restreint tragiquement les options qui s'offrent à elle. « Quelle qualité de société la nature humaine autorise-t-elle ? », a un jour demandé le psychologue Abraham Maslow. « Quelle qualité de nature humaine la société autorise-t-elle ?[6] »

La révolution de la durabilité devra avant tout prendre la forme d'une transformation collective permettant au meilleur de la nature humaine, et non au pire, de s'exprimer et de s'épanouir.

6. Abraham Maslow, *Être humain : la nature humaine et sa plénitude*, Paris, Eyrolles, 2006.

Beaucoup ont pris conscience de cette nécessité et de cette possibilité. John Maynard Keynes écrivait ainsi en 1932 :

Le problème des besoins et de la pauvreté, et la lutte économique entre les classes et les nations ne sont rien d'autre qu'une terrible confusion, transitoire et superflue. Car le monde occidental possède d'ores et déjà les ressources et la technique, pour peu que nous nous organisions pour les utiliser, capables de reléguer le Problème économique, qui pompe notre énergie morale et matérielle, au rang de préoccupation secondaire…

Ainsi le jour est proche où le Problème économique retrouvera le rang subalterne d'où il vient, et où l'arène de nos cœurs et de nos esprits sera occupée par nos véritables problèmes, ceux qui ont trait à la vie et aux relations humaines, à la création, au comportement et à la religion[7].

Aurelio Peccei, ce grand industriel qui n'a cessé d'écrire au sujet des problèmes liés à la croissance et aux limites, à l'économie et à l'environnement, aux ressources et à la gouvernance, ne manquait jamais de conclure en disant que les réponses à ces problèmes passaient par « un nouvel humanisme ». Il s'exprimait ainsi en 1981 :

L'humanisme dont a besoin notre époque doit remplacer et inverser les principes et les normes que nous avons jusqu'à présent considérés comme intouchables, mais qui sont devenus inapplicables ou incompatibles avec notre dessein ; il doit stimuler l'avènement d'un nouveau système de valeurs qui restaurera notre équilibre intérieur et le développement de motivations spirituelles, éthiques, philosophiques, sociales, politiques, esthétiques et artistiques afin de combler la vacuité de nos vies ; il doit pouvoir rétablir en nous l'amour, l'amitié, l'empathie, la solidarité, le sens du sacrifice, la convivialité ; et il doit nous faire comprendre que plus ces qualités nous rapprocheront d'autres formes de vie et de nos congénères partout dans le monde, plus nous aurons à y gagner[8].

---

7. John Maynard Keynes, avant-propos d'*Essais de persuasion*, Paris, Gallimard, 1933.
8. Aurelio Peccei, *Cent pages pour l'avenir*, Paris, Economica, 1981.

Il n'est pas aisé de mettre en pratique l'amour, l'amitié, la générosité, l'empathie ou la solidarité au sein d'un système dont les règles, les objectifs et les flux d'informations en appellent à de moins nobles qualités. Mais nous essayons et nous vous conjurons d'en faire autant. Faites preuve de patience à votre égard et à l'égard des autres, car vous, comme eux, êtes confrontés aux difficultés d'un monde qui change. Montrez de la compréhension et de l'empathie en dépit de votre inévitable résistance ; car la résistance est en chacun de nous, nous nous accrochons tous à ce qui n'est pas durable. Recherchez les instincts les plus nobles en vous et chez les autres, et accordez-leur votre confiance. Écoutez le cynisme qui vous entoure et plaignez ceux qui s'y adonnent, mais ne vous y adonnez pas vous-mêmes.

L'humanité ne peut mener à bien l'aventure qui consiste à ramener son empreinte écologique à un niveau soutenable si ne préside pas à cette démarche un esprit de partenariat planétaire. On ne pourra éviter l'effondrement si les humains n'apprennent pas à se considérer comme partie intégrante d'une seule et même société mondiale. Tout cela nécessite de prendre soin de l'instant présent, mais aussi de l'avenir qui peut paraître éloigné. L'humanité doit apprendre à cultiver l'envie de laisser aux générations futures une planète pleine de vie.

Y a-t-il une chose que nous avons préconisée dans ce livre, depuis l'utilisation plus efficiente des ressources jusqu'à davantage de compassion, qui soit réellement réalisable ? La planète peut-elle vraiment redescendre en deçà des limites et éviter l'effondrement ? L'empreinte écologique des humains peut-elle être réduite à temps ? L'inspiration, la technologie, la liberté, le sens de la communauté, la responsabilité, la prévoyance, l'argent, la discipline et l'amour seront-ils suffisants à l'échelle mondiale ?

De toutes les questions hypothétiques que nous avons posées dans ce livre, ces dernières sont celles pour lesquelles on a le moins de réponses, même si beaucoup font semblant d'en avoir. Même nous, les auteurs, ne sommes pas d'accord entre nous lorsque nous comparons le pour et le contre. L'optimisme convenu

de nombreuses personnes mal informées, surtout parmi les dirigeants de la planète, leur ferait dire que ces questions n'ont même pas lieu d'être ; il n'y a pas de limites significatives. Et parmi les personnes qui sont bien informées, beaucoup sont touchées par un profond cynisme qui perce sous l'optimisme convenu. Pour elles, nous sommes d'ores et déjà confrontés à de graves problèmes, d'autres, pire encore, nous attendent, et nous n'avons aucune chance de nous en sortir.

Ces deux types de réponses s'appuient, bien évidemment, sur des modèles mentaux. La vérité, en l'occurrence, est que *personne ne sait*.

Nous avons dit à maintes reprises dans cet ouvrage que l'humanité n'est pas confrontée à un avenir prédéterminé, mais à un choix. Un choix entre différents modèles mentaux qui, logiquement, conduisent à différents scénarios. L'un de ces modèles mentaux soutient que notre monde n'est pas confronté à des limites pour plein de raisons pratiques. Si l'on choisit ce modèle, on prône la poursuite des activités comme à l'accoutumée et on conduit l'économie humaine très loin au-delà des limites. Cela se traduit par un effondrement.

Selon un autre modèle mental, les limites existent bel et bien et ne sont pas loin d'être atteintes, mais on n'a plus assez de temps pour réagir et les individus ne peuvent se modérer, ni être responsables ni éprouver de la compassion. En tout cas pas assez vite. Ce modèle est autoréalisateur : si les populations choisissent d'y croire, il leur donnera raison. Il se traduit lui aussi par un effondrement.

Il existe un troisième modèle mental selon lequel les limites existent bel et bien et ne sont pas loin d'être atteintes, voire le sont déjà pour certaines d'entre elles, mais nous avons juste assez de temps pour réagir. Il faut donc faire vite. Il y a juste assez d'énergie, de matière, d'argent, de résilience environnementale et de vertu humaine pour enclencher une réduction planifiée de l'empreinte écologique de l'humanité : une révolution de la durabilité vers un monde bien meilleur pour l'immense majorité d'entre nous est possible.

Ce troisième scénario peut tout à fait se révéler faux. Mais d'après ce que nous avons pu recueillir comme informations, depuis les données mondiales jusqu'aux modélisations à l'échelle planétaire, il se peut aussi qu'il soit valable. Et ce n'est qu'en le testant que nous aurons la réponse.

ANNEXE 1

De World3 à World3-03

Pour préparer les scénarios de cet ouvrage, nous nous sommes servis d'une version mise à jour de notre modèle informatique World3-91.

World3 a d'abord été mis au point pour le premier ouvrage, *The Limits to Growth*, qui date de 1972. Il est entièrement décrit dans le rapport technique de notre étude[1]. Notre modèle était écrit dans un langage de simulation informatique appelé DYNAMO. En 1990, un nouveau langage, STELLA, nous offrait les meilleurs outils qui soient pour notre analyse. Lorsque nous avons préparé les scénarios de notre ouvrage de 1992, intitulé *Beyond the Limits*[2], le modèle World3 a donc été converti en langage STELLA et mis à jour sous la forme d'une nouvelle version baptisée World3-91.

Lorsque nous préparions les scénarios de cet ouvrage, il s'est avéré nécessaire d'effectuer une légère mise à jour de World3-91. Le modèle ainsi créé, baptisé World3-03, est disponible sur CD-ROM[3]. Mais il n'est pas difficile de résumer les quelques modifications intervenues entre World3-91 et World3-03 : trois

---

1. Dennis L. Meadows *et al.*, *Dynamics of Growth in a Finite World*, *op. cit.*

2. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows et Jorgen Randers, *Beyond the Limits, op. cit.*

3. Pour le commander, aller sur <www.chelseagreen.com>.

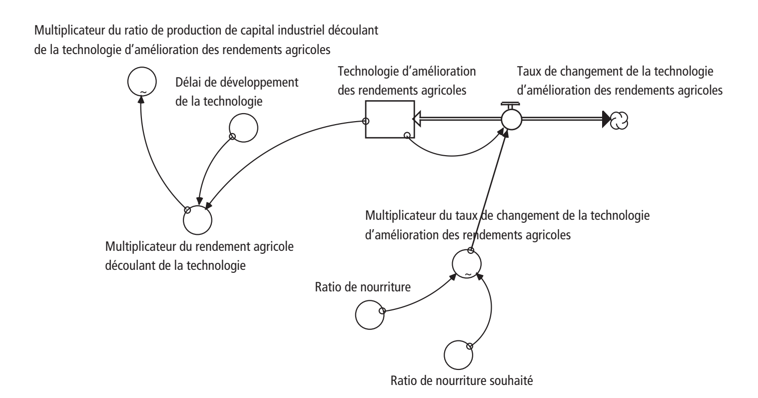
changements ont introduit un calcul différent du coût de la technologie et le souhait de la taille de la famille est désormais plus directement lié à la croissance de la production industrielle. Les autres changements n'ont pas d'incidence sur le comportement du modèle ; ils rendent ce comportement plus facile à comprendre. Voici les divers changements :

- Modification du déterminant du coût en capital des nouvelles technologies dans trois secteurs. Le coût en capital doit être déterminé par la technologie *mise en œuvre* et non par la technologie *disponible* dans le secteur des ressources, de la pollution et de l'agriculture.
- Modification d'une table de référence dans le secteur démographique pour faire en sorte que le souhait de la taille de la famille soit davantage lié aux niveaux élevés de production industrielle par habitant.
- Ajout d'une nouvelle variable appelée *indice de bien-être humain*, un indicateur du bien-être du citoyen mondial moyen. On trouvera la définition de cet indice dans l'annexe 2.
- Ajout d'une nouvelle variable appelée *empreinte écologique des humains*, un indicateur du poids total que l'humanité fait peser sur l'environnement de la planète. On trouvera une définition de cet indice dans l'annexe 2.
- Modification de l'échelle de représentation de la population sur les graphiques pour en simplifier la lecture.
- Réalisation d'un nouveau graphique montrant l'évolution de l'indice de bien-être humain et de l'empreinte écologique des humains entre 1900 et 2100.

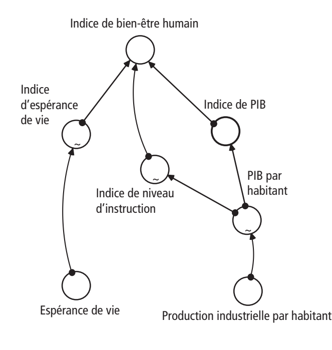
Nous aidons le lecteur en faisant figurer ci-dessous les organigrammes STELLA des nouvelles structures. Nous décrivons également les échelles utilisées pour produire les scénarios de ce livre. On trouvera sur le CD-ROM la liste complète des équations STELLA de World3-03, ainsi que d'autres informations.

Les nouvelles structures de World3-03

Ci-dessous figure l'organigramme STELLA de la formulation relative aux nouvelles technologies ; l'exemple pris est celui des technologies d'amélioration des rendements agricoles, mais cet organigramme est également valable pour le secteur des ressources et celui de la pollution.

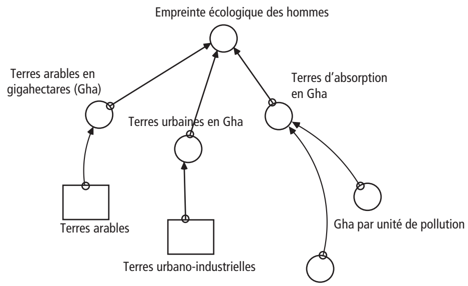


Lorsque la variable du modèle « ratio de nourriture » (nourriture par habitant/nourriture de subsistance par habitant) descend plus bas que le niveau souhaité, World3 développe des technologies pour augmenter le rendement agricole. Des formulations analogues produisent une amélioration de la technologie lorsque la quantité de ressources nécessaires par unité de production industrielle dépasse le niveau souhaité et lorsque la pollution générée par unité de production dépasse elle aussi le niveau souhaité.



L'organigramme STELLA de l'indice de bien-être humain est présenté ci-contre. Sa logique sous-jacente est décrite dans l'annexe 2.

L'organigramme STELLA de l'empreinte écologique des humains est présenté ci-dessous. Sa logique sous-jacente est décrite dans l'annexe 2.



Les échelles des scénarios de World3-03

Les valeurs des 11 variables de World3-03 sont présentées dans les trois graphiques qui constituent chaque scénario de cet ouvrage. Nous n'avons pas indiqué d'échelle sur l'axe des ordonnées de ces graphiques, car nous considérons que les valeurs précises des variables de chaque scénario n'ont que peu d'importance. Les lecteurs s'intéressant davantage aux aspects techniques des simulations trouveront cependant ces échelles ci-dessous. Elles sont très différentes les unes des autres, mais restent les mêmes tout au long des 11 scénarios.

Graphique 1: état de la planète

Variable	Valeur basse	Valeur élevée
Population	0	12×10^{9}
Production totale de nourriture	0	6×10^{12}
Production industrielle totale	0	4×10^{12}
Indice de pollution persistante	0	40
Ressources non renouvelables	0	2×10^{12}

Graphique 2 : niveau de vie matériel

Variable	Valeur basse	Valeur élevée
Nourriture par habitant	0	1 000
Biens de consommation par habitant	0	250
Services par habitant	0	1 000
Espérance de vie	0	90

Graphique 3 : bien-être et empreinte écologique des humains

Variable	Valeur basse	Valeur élevée
Indicateur de bien-être humain	0	1
Empreinte écologique des humains	0	4

ANNEXE 2

Indicateurs de bien-être humain et empreinte écologique

Le contexte

Lorsqu'on aborde le thème de l'avenir de l'humanité sur la planète Terre, il faut définir deux concepts : le « bien-être humain » et l'« empreinte écologique des humains ». Le premier sert à décrire la qualité de vie, au sens le plus large, du citoyen mondial moyen, en prenant en compte les composantes à la fois matérielles et immatérielles, et le second exprime l'impact environnemental total de l'humanité sur l'ensemble des ressources et des écosystèmes mondiaux.

Ces deux concepts sont faciles à appréhender en théorie, mais difficiles à définir avec précision, et le manque de données chronologiques nous oblige à d'importantes approximations lorsque nous développons des équations mathématiques à leur sujet. Mais, d'une façon générale, on peut dire que le bien-être humain augmente lorsque quiconque voit sa satisfaction personnelle croître sans que cela se fasse au détriment de celle des autres. Quant à l'empreinte écologique des humains, elle augmente lorsqu'on extrait davantage de ressources, qu'on émet plus de pollution, que l'érosion des terres ou que la destruction de la biodiversité s'accroissent, le tout sans réduction simultanée d'autres impacts humains sur la nature.

Pour illustrer l'utilisation de ces deux concepts, exprimons par une paraphrase l'idéal que nous n'avons cessé de poursuivre dans cet ouvrage : augmenter le « bien-être humain » tout en faisant en sorte que l' « empreinte écologique » soit aussi basse que possible ou, tout du moins, reste en dessous de ce que l'écosystème mondial peut supporter à très long terme, c'est-à-dire en dessous de sa capacité de charge.

Les analystes ont consacré beaucoup de temps et d'énergie à tenter de créer des indicateurs fonctionnels pour le bien-être humain et pour l'empreinte écologique. Ainsi, le PIB par habitant est souvent utilisé pour mesurer le bien-être de façon simple, bien qu'il présente à cet égard de nombreux défauts. World2[1], prédécesseur de World3, intégrait un « indice de la qualité de vie » qui avait provoqué des débats passionnés à l'époque et qui prenait en compte l'effet de quatre facteurs sur le bien-être humain : la densité de population, la nourriture, la pollution et la consommation matérielle.

Nous avons considéré les différentes options et avons choisi les indicateurs décrits ci-après. Nous avons choisi des indicateurs quantitatifs, car ce sont ceux qui s'accordent le mieux avec le modèle mathématique World3. Et plutôt que de définir nos propres indices, nous avons choisi d'adapter les indicateurs les plus couramment admis.

L'indicateur du développement humain du PNUD

Concernant le bien-être humain, nous avons choisi l'indicateur du développement humain (IDH) qui est mesuré depuis un certain nombre d'années dans la plupart des pays par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). L'IDH est publié chaque année dans le *Rapport sur le développement humain*[2]. Dans celui de 2001, le PNUD définissait l'IDH comme suit :

---

1. Jay W. Forrester, *World Dynamics*, Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1971.

2. Programme des Nations Unies pour le développement, *Rapport sur le développement humain 2001*, Bruxelles, De Boeck, 2001.

L'IDH est un outil synthétique de mesure du développement humain. Il chiffre le niveau moyen atteint par chaque pays sous trois aspects essentiels :

- Aptitude à vivre longtemps et en bonne santé, représentée par l'espérance de vie à la naissance.
- Instruction et accès au savoir, représentés par le taux d'alphabétisation des adultes (pour deux tiers) et par le taux brut de scolarisation, tous niveaux confondus (pour un tiers).
- Possibilité de bénéficier d'un niveau de vie décent, représentée par le PIB par habitant (en PPA-$, Parité de pouvoir d'achat en dollars)[3].

Le PNUD calcule l'IDH en faisant une moyenne arithmétique de trois indices (l'espérance de vie, l'instruction et le PIB) qui correspondent aux trois aspects listés ci-dessus.

Les indicateurs relatifs à l'espérance de vie et à l'instruction augmentent de façon linéaire en fonction de l'espérance de vie, de l'alphabétisation et de la scolarisation. L'indice de PIB augmente lui aussi lorsque le PIB croît. Mais dans ce dernier cas, le PNUD part de l'hypothèse que les bénéfices vont fortement diminuer une fois que le PIB par habitant aura dépassé le niveau atteint en 1999 par les pays de l'ex-Europe de l'Est[4].

L'indice de bien-être humain de World3

Afin de mesurer le bien-être humain dans World3, nous avons élaboré une variable que nous avons baptisée indice de bien-être humain (IBH). L'IBH correspond pour l'essentiel à l'IDH du PNUD, à ceci près que nous n'avons à notre disposition que les variables du modèle World3. L'organigramme STELLA portant sur l'IBH est présenté dans l'annexe 1 et la formulation détaillée est disponible sur le CD-ROM de World3-03.

---

3. *Ibid.*
4. Les détails du mode de calcul de l'IDH sont présentés dans *ibid.*, p. 239-240.

L'indice de bien-être humain de World3 est calculé en faisant la somme des indices d'espérance de vie, de niveau d'instruction et de PIB et en la divisant par trois. L'IBH qui en résulte passe de 0,2 en 1900 à 0,7 en 2000. Il atteint un pic à 0,8 dans les scénarios les plus favorables aux alentours de 2050. Ces trois chiffres équivalent respectivement à l'IDH de la Sierra Leone, de l'Iran et des pays baltes en 1999.

La valeur de notre IBH pour l'année 1999 est très proche de celle de l'IDH calculé par le PNUD pour cette même année, soit une moyenne mondiale de 0,71[5].

L'empreinte écologique de Mathis Wackernagel

Comme mesure de l'« empreinte écologique des humains », nous avons adapté l'empreinte écologique développée par Mathis Wackernagel et ses collègues dans les années 1990. Wackernagel *et al.* ont en effet calculé l'empreinte écologique d'un certain nombre de pays[6] et ont parfois produit des données chronologiques montrant l'évolution au fil du temps de l'empreinte écologique de certains pays en particulier. Et, ce qui est tout à fait intéressant dans l'optique de cet ouvrage, Mathis Wackernagel a également calculé l'empreinte écologique de la population mondiale et son évolution entre 1961 et 1999[7]. L'empreinte écologique de la plupart des pays est publiée tous les deux ans par le WWF[8].

Mathis Wackernagel définit son empreinte écologique comme la surface de terre nécessaire pour satisfaire un mode de vie donné, surface qu'il mesure en hectares (globaux moyens). Il

---

5. PNUD, *Rapport sur le développement humain 2000*, Bruxelles, De Boeck, 2000.

6. Mathis Wackernagel *et al.*, « National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept », *Ecological Economics*, vol. 29, nº 3, juin 1999.

7. Mathis Wackernagel *et al.*, « Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy », *op. cit.* Voir également la figure P-1 de la préface du présent ouvrage, rédigée par les auteurs.

8. WWF, *Rapport « Planète Vivante 2002 »*, *op. cit.*

additionne la surface de terres cultivées, de pâturages, de forêts, de zones de pêche et de terres artificialisées requise pour qu'une population donnée (d'un pays, d'une région ou du monde) puisse conserver un mode de vie donné. Il ajoute la surface de forêts qui aurait été nécessaire pour absorber le dioxyde de carbone émis par l'utilisation anthropique de combustibles fossiles. Tous ces types de terrains sont ensuite convertis en une terre d'une productivité biologique moyenne. Le nombre d' « hectares moyens » s'obtient en utilisant un facteur proportionnel à la productivité biologique de la terre (c'est-à-dire à la faculté de la terre de produire de la biomasse). Mathis Wackernagel souhaite étendre le concept en incluant la surface de terre nécessaire pour neutraliser les émissions (d'autres gaz et de substances toxiques) et pour la consommation d'eau douce, mais il n'est pas encore parvenu à le faire de façon probante.

La productivité biologique d'une surface de terre dépend des technologies utilisées. L'usage intensif d'engrais permet d'obtenir une récolte plus importante à partir de la même surface. L'utilisation accrue d'engrais réduit donc l'empreinte écologique, sauf si les émissions de CO_2 engendrées par la fabrication de l'engrais nécessitent une surface de terres d'absorption supérieure à la surface qui a été économisée en augmentant le rendement. Étant donné que les technologies sont en constante évolution, la productivité des terres calculée par Wackernagel varie elle aussi en permanence au rythme de la « technologie moyenne » en vigueur à une époque donnée[9].

L'empreinte écologique augmente donc lorsque l'humanité utilise des surfaces plus étendues pour produire de la nourriture ou des fibres, ou lorsqu'elle émet davantage de CO_2. Même si ce dernier n'est pas absorbé par les forêts (et s'accumule donc dans l'atmosphère), l'empreinte écologique, soit la surface qui aurait été nécessaire pour absorber le CO_2 si ce dernier ne s'était pas

9. On trouvera plus de détails sur le calcul de l'empreinte écologique dans *ibid.*, p. 30.

accumulé dans l'air, augmente. C'est de cette façon qu'il peut y avoir dépassement, jusqu'à ce que l'accumulation de gaz à effet de serre oblige les humains à adopter une attitude différente qui entraîne la diminution de l'empreinte écologique.

L'empreinte écologique des humains dans World3

Pour mesurer l'empreinte écologique des humains dans le modèle World3, nous avons élaboré un indice que nous avons baptisé empreinte écologique des humains. Il correspond pour l'essentiel à l'empreinte écologique de Wackernagel, à ceci près que nous ne pouvons utiliser qu'un nombre limité de variables dans World3. L'organigramme STELLA qui en résulte est présenté dans l'annexe 1 et la formulation détaillée est disponible sur le CD-ROM de World3-03.

L'empreinte écologique des humains de World3 équivaut à la somme de trois composantes : les terres arables utilisées pour la production agricole, les terres urbanisées utilisées pour les infrastructures de transport urbano-industriel et la quantité de terres d'absorption requise pour neutraliser les émissions de polluants, censée être proportionnelle au taux de génération de pollution persistante. Toutes ces surfaces sont mesurées en milliards (10^9) d'hectares.

L'empreinte écologique des humains est fixée à 1 en 1970, son indice est de 0,5 en 1900, de 1,76 en 2000 et atteint temporairement un niveau supérieur à 3 et donc parfaitement non durable dans les scénarios décrivant le dépassement et l'effondrement. Dans les scénarios les plus favorables, il s'avère possible de maintenir l'empreinte écologique des humains en deçà de 2 pendant la majeure partie du XXIe siècle. Son niveau soutenable se situe probablement aux alentours de 1,1, niveau qui a été dépassé vers 1980.

Liste des tableaux et des figures avec leurs sources

Préface des auteurs

FIGURE P-1 – Empreinte écologique contre capacité de charge

Mathis Wackernagel *et al.*, « Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy », *Proceedings of the Academy of Science 99,* nº 14, Washington, DC, 2002, p. 9266-9271, <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.142033699>.

CHAPITRE 1

Le dépassement

FIGURE 1-1 – La population mondiale

World Population Data Sheet, Washington, DC, Population Reference Bureau, <www.prb.org> (visité pour différentes années).

World Population Prospects as Assessed in 1994, New York, Nations Unies, 1994.

Donald J. Bogue, *Principles of Demography*, New York, John Wiley and Sons, 1969.

FIGURE 1-2 – La production industrielle mondiale

Annuaire statistique, New York, Nations Unies (différentes années).

Annuaire démographique, New York, Nations Unies (différentes années).

World Population Data Sheet, Washington, DC, Population Reference Bureau, <www.prb.org> (visité pour différentes années).

Industrial Statistical Yearbook, New York, Nations Unies (différentes années).

Monthly Bulletin of Statistics, New York, Nations Unies (différentes dates).

FIGURE 1-3 – Concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère

C. D. Keeling et T. P. Whorf, « Atmospheric CO_2 Concentrations (ppmv) Derived from *In Situ* Air Samples Collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii », *Trends : A compendium of Data on Global Change*, 13 août 2001.

A. Neftel, H. Friedli, E. Moor, H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler et B. Stauffer. « Historical CO_2 Record from the Siple Station Ice Core », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, 1994, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/siple.html>.

TABLEAU 1-1 – Croissance mondiale de la population humaine et de certaines activités d'origine anthropique 1950-2000

CRB Commodity Yearbook, New York, Commodity Research Agence Bureau (différentes années).

International Petroleum Monthly, Washington, DC, Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, <www.eia.doe.gov/ipm> (visité le 30 janvier 2002).

International Energy Outlook 1998, Washington, DC, Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, 1998, <www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/>.

International Energy Annual 1999, Washington, DC, Washington, DC, Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, 1999.

Ward's Motor Vehicle Facts and Figures 2000, Southfield, MI, Ward's Communications, 2000.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

World Population Data Sheet, Washington, DC, Population Reference Bureau), <www.prb.org> (visité pour différentes années).

Energy Statistics Yearbook, New York, Nations Unies (différentes années).

Annuaire statistique, New York, Nations Unies (différentes années).

World Motor Vehicle Data, Detroit, Automobile Manufacturers Association, 1998.

World Population Prospects as Assessed in 1994, New York, Nations Unies, 1994.

FIGURE 1-4 – Différents scénarios concernant la population mondiale et le bien-être humain

CHAPITRE 2
Le moteur : la croissance exponentielle

FIGURE 2-1 – Production mondiale de soja

Lester R. Brown *et al., Vital Signs 2000 : the Environmental Trends That are Shaping Our Future*, New York, W. W. Norton, 2000.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

FIGURE 2-2 – Population urbaine mondiale

World Urbanization Prospects : The 1999 Revision, New York, Nations Unies, 2001.

FIGURE 2-3 – Croissance linéaire contre croissance exponentielle de l'épargne

TABLEAU 2-1 – Temps de doublement

TABLEAU 2-2 – Accroissement de la population du Nigeria (extrapolation)

U.S. Census Bureau International Data Base, <www.census.gov/ipc/www/idbnew.html>.

FIGURE 2-4 – Transition démographique mondiale

The World Population Situation in 1970, New York, Nations Unies, 1971.

World Population Prospects : The 2000 Revision, New York, Nations Unies, 2001, <www.un.org/popin/>.

TABLEAU 2-3 – Ajouts à la population mondiale

The World Population Situation in 1970, New York, Nations Unies, 1971.

World Population Prospects : The 2000 Revision, New York, Nations Unies, 2001, <www.un.org/popin/>.

FIGURE 2-5 – Accroissement annuel de la population mondiale

World Population Prospects 2000, New York, Nations Unies, 2000.

Donald J. Bogue, *Principles of Demography*, New York, John Wiley and Sons, 1969.

FIGURE 2-6 – Transition démographique de pays industrialisés et de pays en développement

Nathan Keyfitz et W. Flieger, *World Population : an Analysis of Vital Data*, Chicago, University of Chicago Press, 1968.

J. Chesnais, *The Demographic Transition : Stages, Patterns, and Economic Implications ; a Longitudinal Study of Sixty-Seven Countries Covering the Period 1720-1984*, New York, Oxford University Press, 1992.

Annuaire démographique, New York, Nations Unies (différentes années).
World Population Data Sheet, Washington, DC, Population Reference Bureau, <www.prb.org> (visité pour différentes années).
United Kingdom Office of Population Censuses & Surveys, *Population Trends*, nº 52, Londres, HMSO, juin 1988.
United Kingdom Office for National Statistics (ONS), *National Statistics Online : Birth Statistics : Births and patterns of family building England and Wales* (FM1).
Statistical Yearbook of the Republic of China, Taipei, Directorate-General of Budget, Accounting & Statistics, Executive Yuan, République de Chine, 1995.

FIGURE 2-7 – Taux de natalité et revenu national brut par habitant en 2001

World Population Data Sheet 2001, Washington, DC, Population Reference Bureau, 2001, <www.prb.org>.
Banque mondiale, « Base de données Indicateurs du développement mondial (WDI) », <www.worldbank.org/data/dataquery.html> (visité le 15 janvier 2004) ou <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur>.

FIGURE 2-8 – Flux de capital physique dans l'économie selon World3

FIGURE 2-9 – Revenu national brut par secteur

Département américain du Commerce, *Bureau of Economic Analysis Interactive Access to National Income and Product Accounts Tables*.

FIGURE 2-10 – RNB par habitant des 10 pays les plus peuplés de la planète et de l'Union européenne

World Development Indicators CD-ROM, Washington, DC, Banque mondiale, 2002.

FIGURE 2-11 – Disparités mondiales

World Development Indicators CD-ROM, Washington, DC, Banque mondiale, 1999.

FIGURE 2-12 – Production alimentaire par région

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.
La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (différentes années).

CHAPITRE 3
Les limites : sources et exutoires

FIGURE 3-1 – Population et capital dans l'écosystème planétaire

R. Goodland, H. Daly et S. El Serafy, « Environmentally Sustainable Economic Development Building on Bruntland », *Environment Working Paper of The World Bank*, n° 46, juillet 1991.

FIGURE 3-2 – Production céréalière mondiale

Annuaire de la production, Rome, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (différentes années).

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

World Population Data Sheet 2001, Washington, DC, Population Reference Bureau, <www.prb.org> (visité pour différentes années).

FIGURE 3-3 – Rendements céréaliers

Annuaire de la production, Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (différentes années).

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

FIGURE 3-4 – Scénarios possibles pour l'avenir de l'agriculture

World Population Prospects as Assessed in 1990, New York, Nations Unies, 1990.

World Population Data Sheet 2001, Washington, DC, Population Reference Bureau, 1991, <www.prb.org>.

World Population Projections to 2150, New York, Nations Unies, 1998.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

FIGURE 3-5 – Ressources d'eau douce

Peter Gleick, *The World's Water 2000-2001 : the Biennal Report on Freshwater Resources*, Washington, DC, Island Press, 2000.

Sandra Postel, Gretchen C. Daily et Paul R. Ehrlich, « Human Appropriation of Renewable Fresh Water », *Science*, vol. 271, n° 5250, 9 février 1996.

Donald J. Bogue, *Principles of Demography*, New York, John Wiley and Sons, 1969.

World Population Prospects as Assessed in 1994, New York, Nations Unies, 1994.

World Population Prospects as Assessed in 2000, New York, Nations Unies, 2000.

FIGURE 3-6 – La consommation d'eau aux États-Unis

Peter Gleick, *The World's Water*, Washington, DC, Island Press, 1998.

Peter Gleick, *The World's Water 2000-2001 : the Biennal Report on Freshwater Resources*, Washington, DC, Island Press, 2000.

FIGURE 3-7 – Ce qu'il reste de forêts primaires

The Last Frontier Forests : Ecosystems and Economies on the Edge, World Resources Institute Forest Frontiers Initiative, 1997, <www.wri.org/ffi/lff-eng>.

FIGURE 3-8 – Exemples de scénarios de déforestation tropicale

FIGURE 3-9 – Consommation mondiale de bois

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

FIGURE 3-10 – Consommation mondiale d'énergie

Annuaire des statistiques de l'énergie, New York, Nations Unies (différentes années).

Département américain de l'énergie, base de données sur l'énergie internationale de l'Agence américaine pour l'information sur l'énergie, <www.eia.doe.gov/emeu/international/energy.html>.

International Energy Outlook 2001, Washington, D.C., Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, 2001, <www.eia.gov.oiaf/ieo/>.

TABLEAU 3-1 – Production annuelle, ratios réserves/production (R/P) et durée de vie estimée des ressources de pétrole, gaz naturel et charbon

U.S. Bureau of Mines, *Mineral Facts and Problems,* Washington, D.C., imprimerie du Gouvernement, 1970.

International Energy Statistics Sourcebook, 14e édition, Tulsa, OK, PennWell Pub. Co., 1999.

International Energy Annual 2001, Washington, D.C., Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, 2001, <www.eia.gov/emeu/iea/contents.html>.

Rapport spécial du GIEC – Scénarios d'émissions, chapitre 3.4.3.1, « Fossile and Fissile Resources », <http://grida.no/climate/ipcc/emission/071.htm> (consulté le 19 janvier 2004).

FIGURE 3-11 – Production et consommation de pétrole aux États-Unis

Basic Petroleum Data Book, Washington, D.C., Institut américain du pétrole, 1981.

Annual Energy Review, Washington, D.C., Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, <www.eia.doe.gov/emeu/aer/txt/tab0502.htm>.

FIGURE 3-12 – Scénarios concernant la production mondiale de pétrole

Kenneth S. Deffeyes, *Hubbert's Peak : the Impending World Oil Shortage*, Princeton, Princeton University Press, 2001.

FIGURE 3-13 – Différents scénarios possibles de l'épuisement des ressources mondiales de gaz

FIGURE 3-14 – Quantités de nouveaux gisements nécessaires pour maintenir l'augmentation actuelle de la consommation de gaz

FIGURE 3-15 – Coût de l'électricité tirée de l'éolien et des systèmes photovoltaïques

« What are the Factors in the Cost of Electricity from Wind Turbines ? », American Wind Energy Association, 2000.

Renewable Energy 2000 : Issues and Trends, Washington D.C., Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Département américain de l'énergie, février 2001.

FIGURE 3-16 – Consommation mondiale de cinq métaux importants

C. G. M. Klein Goldewijk et J. J. Battjes, « A Hundred Year (1890-1990) Database for Integrated Environmental Assessments (HYDE, version 1.1) », Bilthoven, Pays-Bas, Institut national de la santé publique et de l'environnement, 1997.

U.S. Bureau of Mines, *Minerals Yearbook*, Washington, D.C., imprimerie du Gouvernement (différentes années).

U.S. Geological Survey, Statistical Compendium, ressource en ligne, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/stat/>.

CRB Commodity Yearbook, New York, Bureau de recherche sur les matières premières (différentes années).

FIGURE 3-17 – Consommation mondiale d'acier

C. G. M. Klein Goldewijk et J. J. Battjes, « A Hundred Year (1890-1990) Database for Integrated Environmental Assessments (HYDE, version 1.1) », Bilthoven, Pays-Bas, Institut national de la santé publique et de l'environnement, 1997.

U.S. Bureau of Mines, *Minerals Yearbook*, Washington DC, imprimerie du Gouvernement (différentes années).

U.S. Geological Survey, Statistical Compendium, ressource en ligne, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/stat/>.
CRB Commodity Yearbook, New York, Bureau de recherche sur les matières premières (différentes années).

TABLEAU 3-2 – Durée de vie des réserves identifiées de huit métaux

Mining, Minerals and Sustainable Development Project (MMSD), *Breaking New Ground : Mining, Minerals and Sustainable Development*, Londres, Earthscan, 2002 ; <www.iied.org/mmsd/finalreport/> et document de synthèse en français sur <http://pubs.iied.org/pdfs/G00771.pdf>.

FIGURE 3-18 – La baisse de qualité des minerais de cuivre exploités aux États-Unis

U.S. Bureau of Mines, *Minerals Yearbook*, Washington, D.C., imprimerie du Gouvernement (différentes années).
U.S. Geological Survey, Statistical Compendium, ressource en ligne, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/stat/>.

FIGURE 3-19 – L'épuisement des minerais accroît fortement la quantité de déchets miniers issus de leur production

FIGURE 3-20 – Baisse de la contamination des humains et de l'environnement

DDT : IVL Institut suédois de recherche sur l'environnement, *Swedish Environmental Monitoring Surveys Database*.
Césium 137 : *AMAP Assessment Report : Arctic Pollution Issues*, Oslo, Norvège, Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique, 1998, <www.amap.no/Assessment/ScientificBackground.htm>.
Plomb : *America's Children and the Environment : Measures of Contaminants, Body Burdens, and Illnesses*, 2e édition, Washington, D.C., Agence pour la protection de l'environnement, février 2003.

FIGURE 3-21 – Tendances des émissions de certains polluants atmosphériques

World Development Indicators CD-ROM, Washington, DC, Banque mondiale, 2001.
Données OCDE sur l'environnement – Compendium, Paris, Organisation de coopération et de développement économiques (différentes années).
CO_2 : G. Marland, T.A. Borden et R.J. Andres, « Global, Regional, and National Fossil Fuel CO_2 Emissions », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/em_cont.html>.

SO_x et NO_x : World Resources Database CD-ROM Electronic Resource, Washington, D.C., World Resources Institute, 2000.

Consommation d'énergie : *Bilans énergétiques des pays de l'OCDE*, sur disquette, Paris, Organisation de coopération et de développement économiques (différentes années).

FIGURE 3-22 – Niveaux d'oxygène dans certaines eaux polluées

Andrew Goudie, *The Human Impact on the Natural Environment*, Oxford, Blackwell, 1993.

P. Kristensen et H. Ole Hansen, *European Rivers and Lakes : Assessment of Their Environmental State*, Copenhague, Agence européenne pour l'environnement, 1994.

Données OCDE sur l'environnement – Compendium, Paris, Organisation de coopération et de développement économiques, 1999.

New York Harbor Water Quality Survey, New York, Direction générale de la protection de l'environnement, 1997.

Bjørn Lomborg, *L'écologiste sceptique – Le véritable état de la planète,* Paris, Le cherche midi, 2004.

FIGURE 3-23 – Concentrations en gaz à effet de serre au niveau mondial

CFC : M. A. K. Khalil et R. A. Rasmussen, « Globally Averaged Atmospheric CFC-11 Concentrations : Monthly and Annual Data for the Period 1975-1992 », Carbone Dioxide Information Analysis Center (CDIAC).

CH_4 : D.M. Etheridge, I. Pearman, P.J. Fraser, « Concentrations of CH_4 from the Law Dome (East Side, « DE08 » Site) Ice Core (a) », Carbon Dioxide Information Analysis Center (1er septembre 1994).

C. C. Keeling et T. P. Whorf, « Atmospheric CO_2 Concentrations (ppmv) Derived from In Situ Air Samples Collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, 13 août 2001.

A. Neftel, H. Friedli, E. Moor, H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler et B. Stauffer, « Historical CO_2 Record from the Siple Station Ice Core », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, 1994, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/siple.html>.

N_2O : J. Flückiger, A. Dällenbach, B. Stauffer, « N_2O Data Covering the Last Millenium », NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, 1999, <www.ngdc.noaa.gov/paleo/gripn2o.html>.

R. G. Prinn *et al.*, « A History of Chemically and Radiatively Important Gases in Air Deduced from ALE/GAGE/AGAGE » *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, nº D14, p. 17751-92, 2000, <http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/alegage.html>.

FIGURE 3-24 – L'augmentation de la température mondiale

P. D. Jones, D. E. Parker, T. J. Osborn et K. R. Briffa, « Global and Hemispheric Temperature Anomalies : Land and Marine Instrumental Records », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, 2001, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html>.

FIGURE 3-25 – Pertes économiques dans le monde dues à des catastrophes climatiques

Lester R. Brown *et al*. (Worldwatch Institute), *Vital Signs 2000 : the Environmental Trends That are Shaping Our Future*, New York, W. W. Norton, 2000.

FIGURE 3-26 – Gaz à effet de serre et températures de la planète au cours des 160 000 dernières années

J. Jouzel, C. Lorius, J. R. Petit, N. I. Barkov et V. M. Kotlyakov, « Vostok Isotopic Temperature Record », *Trends '93 : A Compendium of Data on Global Change*, 1994, <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends93/temp/vostok.593>.

C. D. Keeling et T. P. Whorf, « Atmospheric CO_2 Concentrations (ppmv) Derived from *In Situ* Air Samples Collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii », *Trends : A compendium of Data on Global Change*, 13 août 2001.

J. M. Barnola, D. Raynaud, C. Lorius et N. I. Barkov, « Historical Carbon Dioxide Record from the Vostok Ice Core », *Trends : A Compendium of Data on Global Change*, 1999, <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/vostok.html>.

R. G. Prinn *et al*., « A History of Chemically and Radiatively Important Gases in Air Deduced from ALE/GAGE/AGAGE » *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, nº D14, p. 17751-92, 2000.

J. Chappellaz, J. M. Barnola, D. Raynaud, C. Lorius et Y. S. Korotkevich, « Historical CH_4 Record from the Vostok Ice Cores », *Trends '93 : A Compendium of Data on Global Change*, 1994.

TABLEAU 3-3 – L'impact environnemental de la population, de l'abondance et de la technologie

CHAPITRE 4
World3 : la dynamique de la croissance dans un monde fini

FIGURE 4-1 – Nutrition et espérance de vie

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, —<http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

World Population Prospects : the 2000 Revision, New York, Nations Unies, 2001, <www.un.org/popin/>.

FIGURE 4-2 – Coûts d'exploitation de nouvelles terres agricoles

Dennis L. Meadows *et al.*, *Dynamics of Growth in a Finite World*, Cambridge, MA, Wright-Allen Press, 1974.

FIGURE 4-3 – Possibles modes d'approche d'une population vis-à-vis de sa capacité de charge

FIGURE 4-4 – Boucles de rétroaction de la croissance de la population et du capital

FIGURE 4-5 – Boucles de rétroaction de la population, du capital, de l'agriculture et de la pollution

FIGURE 4-6 – Boucles de rétroaction de la population, du capital, des services et des ressources

FIGURE 4-7 – Énergie nécessaire pour produire du métal pur à partir d'un minerai

N. J. Page et S. C. Creasey, « Ore Grade, Metal Production, and Energy », *Journal of Research*, U.S. Geological Survey, vol. 3, nº 1, janvier/février 1975.

FIGURE 4-8 – Scénario 0 : infinité en entrée, infinité en sortie

FIGURE 4-9 – Causes structurelles des quatre modes de comportement possibles du modèle World3

FIGURE 4-10 – La lente percolation du 1,2-dichloropropane dans les eaux souterraines

N. L. van der Noot, NV Waterleidingmaatschappij « Drenthe », Geohydrologisch modelonderzoek ten behoeven van het nitraat – en 1,2-DCP onderzoek in de omgeving van het pompstation Noordbargeres [Institut NV de gestion des eaux « Drenthe », études géohydrologiques modélisées de l'évolution des mesures de nitrates et de

1,2-DCP dans l'environnement de la station de pompage Nordbargares], 1991, R. van de Berg (RIVM), communication privée.

FIGURE 4-11 – Scénario 1 : un point de repère

FIGURE 4-12 – Scénario 2 : des ressources non renouvelables plus abondantes

CHAPITRE 5

L'histoire de la couche d'ozone ou la preuve qu'il est possible de redescendre en deçà des limites

FIGURE 5-1 – Production mondiale de chlorofluorocarbones

Production mondiale annuelle de fluorocarbones, « Production and Sales of Fluorocarbons », Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS), 2002, <www.afeas.org/production_and_sales.html>.

FIGURE 5-2 – L'absorption de la lumière par l'atmosphère

The Ozone Layer, Nairobi, Kenya, Programme des Nations Unies pour l'environnement, 1987.

FIGURE 5-3 – La destruction de l'ozone stratosphérique par les CFC

FIGURE 5-4 – Mesures de l'ozone à Halley en Antarctique

J. D. Shanklin, « Provisional Monthly Mean Ozone Values for Faraday/Vernadsky and Halley », British Antarctic Survey, <www.antarctica.ac.uk/met/jds/ozone/>.

FIGURE 5-5 – Plus le chlore réactif augmente, plus l'ozone de l'Antarctique diminue

J. G. Anderson, W. H. Brune et M. H. Proffitt, « Ozone Destruction by Chlorine Radicals within the Antarctic Vortex : the Spatial and Temporal Evolution of ClO-O_3 Anticorrelation Based on *In Situ* ER-2 Data », *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, nº D9, 30 août 1989.

FIGURE 5-6 – Projection de l'augmentation de la concentration de chlore et de bromure stratosphériques inorganiques due aux émissions de CFC

« Scientific Assessment of Ozone Depletion : 1998 – Executive Summary », Organisation météorologique mondiale, Projet mondial de surveillance et de recherche concernant l'ozone, rapport nº 44, <www.al.noaa.gov/WWWHD/Pubdocs/Assessment98.html>.

John S. Hoffman et Michael J. Gibbs, « Future Concentrations of Stratospheric Chlorine and Bromine », U.S. Environmental Protection Agency, EPA 400/1-88/005, août 1988.

R. E. Bendick, *Ozone Diplomacy : New Directions in Safeguarding the Planet*, Cambridge, Harvard University Press, 1991.

CHAPITRE 6
La technologie, les marchés et le dépassement

FIGURE 6-1 – Scénario 3 : des ressources non renouvelables plus accessibles et des techniques de contrôle de la pollution

TABLEAU 6-1 – Impact de la technologie sur les émissions de polluants persistants dans World3

FIGURE 6-2 – Scénario 4 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution et une amélioration des rendements agricoles

FIGURE 6-3 – Scénario 5 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution, une amélioration des rendements agricoles et une protection contre l'érosion des sols

FIGURE 6-4 – Scénario 6 : des ressources non renouvelables plus accessibles, des techniques de contrôle de la pollution, une amélioration des rendements agricoles, une protection contre l'érosion des sols et une technologie permettant l'utilisation efficiente des ressources

FIGURE 6-5 – Le coût non linéaire de la dépollution

T. van Harmelen, J. Bakker, B. de Vries, D. van Vuuren, M. den Elzen et P. Mayerhofer, « An Analysis of the Costs and Benefits of Joint Policies to Mitigate Climate Change and Regional Air Pollution in Europe », *Soil and Water Pollution*, vol. 5, nº 4, 2000.

FIGURE 6-6 – Utilisation de la capacité de production de pétrole de l'OPEP et cours mondiaux du brut

International Energy Statistics Sourcebook, Tulsa, OK, PennWell Pub. Co. (différentes années).

Département américain de l'énergie, Agence américaine pour l'information sur l'énergie, Base de données en ligne : <http://eia.doe.gov/emeu/international/energy.html>.

Worldwide Petroleum Industry Outlook, Tulsa, OK, PennWell Pub. Co. (différentes années).

FIGURE 6-7 – Captures mondiales de poisson sauvage

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), base de données FAOSTAT en ligne, <http://faostat.fao.org/?lang=fr>.

FIGURE 6-8 – Baisse de la population de thons rouges

« Session ICCAT SCRS d'évaluation des stocks d'albacore de l'Atlantique », Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique (ICCAT) *Collective Volume of Scientific Papers*, vol. 52, 2001.

CHAPITRE 7
Transitions vers un système soutenable

FIGURE 7-1 – Scénario 7 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population

FIGURE 7-2 – Scénario 8 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population et sa production industrielle par habitant

FIGURE 7-3 – Scénario 9 : la planète cherche à partir de 2002 à stabiliser sa population et sa production industrielle par habitant et ajoute des technologies relatives à la pollution, aux ressources et à l'agriculture

FIGURE 7-4 – Scénario 10 : quand les politiques de durabilité du Scénario 9 sont introduites 20 ans plus tôt, soit en 1982



Faites circuler nos livres.

Discutez-en avec d'autres personnes.

Si vous avez des commentaires, faites-les-nous parvenir; il nous fera plaisir de les communiquer aux auteurEs et à notre comité éditorial.

Les Éditions Écosociété
C.P. 32052, comptoir Saint-André
Montréal (Québec) H2L 4Y5

Courriel: info@ecosociete.org
Toile: www.ecosociete.org

NOS DIFFUSEURS

EN AMÉRIQUE

Diffusion Dimédia inc.
539, boulevard Lebeau
Saint-Laurent (Québec) H4N 1S2
Téléphone: (514) 336-3941
Télécopieur: (514) 331-3916
Courriel: general@dimedia.qc.ca

EN FRANCE et EN BELGIQUE

DG Diffusion
ZI de Bogues
31750 Escalquens
Téléphone: 05 61 00 09 99
Télécopieur: 05 61 00 23 12
Courriel: dg@dgdiffusion.com

EN SUISSE

Servidis S.A
Chemin des Chalets
1279 Chavannes-de-Bogis
Téléphone et télécopieur: 022 960 95 25
Courriel: commandes@servidis.ch



Dennis Meadows

Sur le front écologique, 1972 fut une année charnière à plus d'un titre. Année de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain (CNUEH) à Stockholm — premier véritable rendez-vous international à caractère environnemental —, c'est aussi celle de la parution du premier rapport d'importance sur les dangers d'une croissance économique soutenue dans un monde fini.

Intitulée *Halte à la croissance ? Rapport sur les limites à la croissance*, cette étude de quatre jeunes scientifiques du MIT mandatés par le Club de Rome demeure aujourd'hui l'une des plus puissantes critiques du consensus sur la sacro-sainte croissance économique. Sa parution est reconnue comme l'un des moments clés de l'histoire du mouvement écologiste.

Si plusieurs doutaient à l'époque des conclusions du rapport Meadows — du nom de ses auteurs principaux —, le temps a su leur donner raison. Dans cette dernière mise à jour parue en 2004, le raisonnement des auteurs garde toute sa pertinence, au vu de l'impact destructeur des activités humaines sur les processus naturels. En simulant les interactions entre croissance démographique, croissance industrielle, production alimentaire et limite des écosystèmes, les chercheurs élaborent différentes trajectoires possibles pour notre civilisation. Ils concluent que le pire scénario, celui de l'effondrement, se joue actuellement sous nos yeux.

Car après trois décennies d'expansion économique débridée, le problème n'est plus de savoir comment éviter d'excéder les limites de la planète, mais bien comment faire pour revenir à l'intérieur de ces limites.

Dennis Meadows est professeur émérite de l'Université du New Hampshire en gestion des systèmes. Donella Meadows (1941-2001) était spécialiste des systèmes et professeure d'études environnementales au Darmouth College (New Hampshire). Jorgen Randers est professeur de stratégie climatique à la BI Norwegian Business School d'Oslo.

Qu'est-ce qu'un « Retrouvailles » d'Écosociété ? Un livre qui n'a jamais cessé d'être présent chez les militants, sur le terrain. Un texte que l'on aime raconter, comme un mauvais coup. Un outil pour remuer le monde.